



UFPI



UFC



UFRN



UFPB



UFPE



UFS



UESC

JOSÉ BEZERRA DE ALMEIDA NETO

**APROVEITAMENTO DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS PARA
ELABORAÇÃO DE PASTA DE CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA**

SÃO CRISTÓVÃO/SE

2017

JOSÉ BEZERRA DE ALMEIDA NETO

**APROVEITAMENTO DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS PARA
ELABORAÇÃO DE PASTA DE CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título em Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Sergipe.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza
Coorientador: Prof. Dr. José Jailton Marques

SÃO CRISTÓVÃO/SE

JUNHO/2017

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

A447a Almeida Neto, José Bezerra de.
Aproveitamento do cascalho de perfuração de poços para elaboração de pasta de cimentação primária / José Bezerra de Almeida Neto; orientador Roberto Rodrigues de Souza . – São Cristóvão, 2017.
138 f.

Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, 2017.

1. Indústria petrolífera. 2. Impacto ambiental. 3. Poços de petróleo submarino - Perfuração. 4. Resíduos. 5. Cimento. I. Souza, Roberto Rodrigues de, orient. II. Título.

CDU 665.6/.7

JOSÉ BEZERRA DE ALMEIDA NETO

**APROVEITAMENTO DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS PARA
ELABORAÇÃO DE PASTA DE CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA**


Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente,
como requisito final para obtenção do título em Doutor em Desenvolvimento e Meio
Ambiente pela Universidade Federal de Sergipe.

Aprovado em 13 de junho de 2017.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza – Orientador
DEQ & PRODEMA - UFS



Prof. Dr. José Jailton Marques – Co-orientador
DEAM - UFS



Dr. Túlio Ytérbio Fernandes Vale – Examinador Externo
PETROBRAS



Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva – Examinador Externo
NUPETRO - UFS



Prof. Dr. Acto de Lima Cunha – Examinador Externo
NUPETRO - UFS



Prof. Dr. Jefferson Arlen Freitas – Examinador Externo
DEAM - UFS

Este exemplar corresponde à versão da Tese de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, concluído no Programa em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).



Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA

Universidade Federal de Sergipe

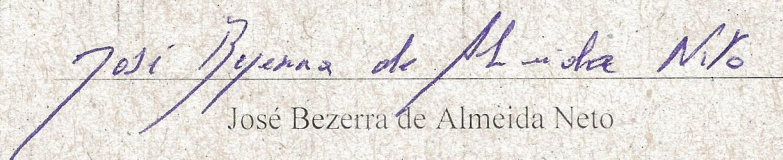


Prof. Dr. José Jailton Marques

Departamento de Engenharia Ambiental – DEAM

Universidade Federal de Sergipe

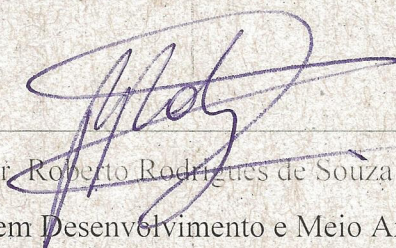
É concedido ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), da Universidade Federal de Sergipe (UFS), responsável pelo Curso de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente permissão para disponibilizar, reproduzir cópia desta Tese e emprestar ou vender tais cópias.



José Bezerra de Almeida Neto

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA

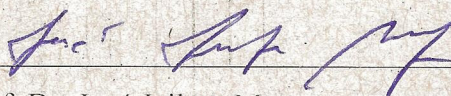
Universidade Federal de Sergipe



Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA

Universidade Federal de Sergipe



Prof. Dr. José Jailton Marques

Departamento de Engenharia Ambiental – DEAM

Universidade Federal de Sergipe

DEDICATÓRIA

“Quando morremos nada pode ser levado conosco, com a exceção das sementes lançadas por
nosso trabalho e do nosso conhecimento”.

Dalai Lama

À minha esposa Ellana Cássia e aos meus filhos, que muitas vezes renunciaram aos seus sonhos, para que eu pudesse realizar os meus. Esta conquista não é só minha, mas nossa. O que consegui só foi possível graças ao amor, apoio e dedicação que sempre tiveram por mim. Agradeço-lhes pela paciência e compreensão com minha ausência durante essa longa jornada.

À minha mãe Martha, por sempre me incentivar, apoiar e acreditar na transposição dos obstáculos impostos pela vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar, inspirar e me dar equilíbrio para seguir em frente com os meus objetivos e não me deixar abater com as dificuldades encontradas.

Em segundo lugar, agradeço à minha família que sempre me motivou, entendeu os momentos de afastamento e reclusão.

No decorrer da pesquisa descobrimos a significância das várias pessoas em nossa trajetória. Assim, gostaria também de agradecer ao professor Dr. Júlio Freitas (pesquisador e coordenador do LabCim da UFRN) e a Paulo Henrique Santos (supervisor do LabCim).

Um especial agradecimento aos professores Dr. Roberto Rodrigues (orientador), Dr. José Jailton Marques e ao Dr. Túlio Ytérbio Fernandes Vale, orientador, coorientador e examinador externo, respectivamente, no meu doutorado.

RESUMO

A indústria de petróleo, em todos os seus segmentos, tem potencial para causar impactos ao meio ambiente. Um dos principais impactos sobre o meio físico, gerado pela indústria de petróleo, está associado à perfuração de poços de petróleo em virtude da geração de diversos resíduos, entre os quais estão os fluidos de perfuração e os cascalhos resultantes da perfuração de poços de petróleo. Estima-se que na região Nordeste do Brasil exista atualmente uma quantidade de resíduos da ordem de 100 mil m³ oriundos do processo de perfuração de poços terrestres para a produção de petróleo e, ainda, em função do crescente número de poços, presume-se uma geração anual de 50 mil m³. Devido à quantidade gerada de cascalhos e seus contaminantes orgânicos e inorgânicos, como também o tratamento, o transporte, o descarte, e os expressivos custos associados, geralmente há contratempo no gerenciamento destes resíduos sólidos, como por exemplo, a adequação do volume de cascalhos produzidos por um período de tempo versus o tempo necessário para a avaliação e liberação de área destinada ao aterro industrial, pelos órgãos de controle e fiscalização do estado, visando o acolhimento e manutenção, em segurança, destes resíduos. O presente estudo tem por objetivo analisar a viabilidade técnica da adição dos resíduos de cascalhos de perfuração (RCP) na pasta de cimento, utilizada em poços de petróleo. As propriedades físico-químicas das pastas de cimento com cascalhos retratadas neste estudo são derivadas de testes laboratoriais efetuados para a adequação das mesmas aos parâmetros técnicos estabelecidos por operadora. Os testes executados em laboratório foram: massa específica, reologia, filtrado, água livre, tempo de espessamento, estabilidade e resistência compressiva da pasta. Alguns resultados relevantes são descritos a seguir, destacando-se o aumento de 8% no rendimento das pastas de cimento com cascalhos examinadas, com relação às pastas de cimento convencionais, para uma dada massa específica. A resistência compressiva destas pastas, nas condições de poço investigadas, atinge, no mínimo, 2600 psi em até 29 horas. A inovação tecnológica apresentada neste estudo, conforme o enquadramento técnico requerido pela operadora para pasta de cimento utilizada em cimentações primárias de intervalos produtores, demonstra ser economicamente viável, uma vez que a introdução de 10% de cascalhos de perfuração na composição de pastas de cimento proporciona uma redução no custo específico da pasta de cimento, em decorrência da redução do teor de cimento e produtos químicos relacionados a este, na pasta produzida, assim como a redução de mais de 80% no custo do beneficiamento dos cascalhos, bem como a diminuição do custo de logística e outros custos correlatos para a operadora, devido a menor volume de resíduos destinados a aterros controlados. Ademais, tal iniciativa pode ser considerada socialmente justa, em virtude de conceber uma oportunidade de investimento para a realização do beneficiamento dos cascalhos pela sociedade, por meio de associações ou cooperativas, viabilizando a geração de emprego e renda; e ambientalmente sustentável, em razão da redução do descarte de cascalhos para o ambiente, quer seja pela disposição em aterros industriais ou injeção no subsolo.

Palavras-Chave: Petróleo. Cascalho. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The oil industry, in all its segments has the potential to cause environmental impacts. One major impact on the physical environment, generated by the oil industry, is associated with the drilling of oil wells due to the waste generation, among which are the drilling fluid and cuttings resulting from oil well drilling. It is estimated that in Brazil's Northeast region currently exists a waste quantity in the order of 100,000 m³ coming from land drilled wells for oil production and also due to the increasing well numbers, it is presumed a generating of 50 m³ by year. Due to the drill cuttings amount and its organic and inorganic contaminants generated, as well as the treatment, transportation, disposal and associated costs, there is usually a backset in the solid waste management, such as the adequacy of the drill cuttings produced volume over a period of time versus the evaluation and release times of the destined area to the industrial landfill, by the State's control and inspection, aiming at the reception and maintenance safe of these wastes. The present study aims to analyze the technical feasibility of the drill cuttings wastes adding (DCW) in the cement slurry, used in oil wells. The cement slurry physicochemical properties with drill cuttings depicted in this study are the lab test results carried out to adapt them to the technical parameters established by the oil company. The cement slurry lab tests done were: density, rheology, filtrate, free water, thickening time, stability and compressive strength. Some relevant results are described below. Some relevant results are described below, with the focus on the raise of 8% in the yield of the examined cement slurries with drill cuttings, compared to the conventional cement slurries, for a given density. The compressive strength of these cement slurries, under the investigated well conditions, reaches, at least, 2600 psi in up to 29 hours. The technological innovation presented in this study, according to the technical framework required by oil company for cement slurry used in primary cementing for producer intervals, proves to be feasible economically, since the introduction of 10% of drilling cuttings into the cement slurry composition provides a cement slurry cost reduction by produced volume, as a result of the cement content and related chemicals decreases, as well as the reduction of over 80% in the drill cuttings processing cost to the oil drilling contractors, due to the lower waste volume destined for controlled landfills. In addition, such an initiative can be considered fair socially because it creates an investment opportunity for the drill cuttings processing by society, through partnerships or cooperatives, enabling the employment and income generation; And sustainable environmentally, by reducing the drill cuttings disposal to the environment, whether by industrial landfill disposal or underground injection.

Keywords: Oil. Cuttings. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Política dos 3 R's	22
Figura 02 – Logística reversa.	25
Figura 03 – A ótica da racionalidade e do saber ambiental.....	27
Figura 04 – Fluxo convencional dos cascalhos de perfuração.	31
Figura 05 – Dique de armazenamento provisório de cascalhos no campo de Carmópolis/SE.	38
Figura 06 – Sistema de controle de sólidos em uma sonda de perfuração.	41
Figura 07 – Cascalho produzido após o processo de recuperação do fluido de perfuração.	42
Figura 08 – Secagem do cascalho ao ar livre.	42
Figura 09 – Disposição de um projeto de aterro controlado.....	46
Figura 10 – Central de resíduos do Alto de Jericó – Sergipe.	48
Figura 11 – Fluxograma esquemático da injeção dos cascalhos em cavidades subterrâneas em mina de salgema.	49
Figura 12 – Representação de uma cimentação primária.	53
Figura 13 – Poços da bacia Sergipe - Alagoas.	63
Figura 14 – Fluxograma sequencial de testes realizados e equipamentos em laboratório de cimentação.	65
Figura 15 – Consistômetro atmosférico.	67
Figura 16 – Massa específica (aparente) da pasta obtido através da balança convencional.	68
Figura 17 – Massa específica (real) da pasta obtido através da balança pressurizada.	68
Figura 18 – Consistômetro pressurizado com mecanismo de calibração.....	70
Figura 19 – Célula do consistômetro pressurizado.....	70
Figura 20 – Filtro prensa e célula de filtrado API (em detalhe, no canto superior direito).....	71
Figura 21 – Analisador ultrassônico de cimento.	72
Figura 22 – Célula do analisador ultrassônico de cimento (UCA).....	73
Figura 23 – Proveta de 250 mL para medição do teor de água livre.	74
Figura 24 – Desenho de uma proveta de 250 mL para medição do teor de água livre.	75
Figura 25 – Cilindro de cobre bipartido para a determinação da estabilidade da pasta.	76
Figura 26 – Reômetro rotativo com combinação bob rotor R1-B1.....	77
Figura 27 – Reômetro rotativo com calibradores para as molas.	77
Figura 28 – Tratamento convencional do cascalho.	79
Figura 29 – Componentes básicos para o processamento do cascalho.....	81
Figura 30 – Secador rotativo para efluentes.	82
Figura 31 – Fluxo de material e estrutura do secador de cascalho.	83
Figura 32 – Representação esquemática do secador rotativo para efluentes.....	83
Figura 33 – Tratamento proposto do cascalho.....	85
Figura 34 – Representação esquemática de um moinho de bolas.	86
Figura 35 – Moinho de bolas.....	86
Figura 36 – Peneira vibratória.	87
Figura 37 – Representação esquemática do beneficiamento do cascalho.	88
Figura 38 – Fluxograma esquemático da composição e mistura do cascalho gerado por fluido de perfuração de base sintética, em relação ao cimento especial.	90

Figura 39 – Misturador de palheta com controlador de velocidade.	91
Figura 40 – Balança pressurizada, caixa, êmbolo e tampa.	92
Figura 41 – Consistômetro pressurizado, sem mecanismo de calibração.	93
Figura 42 – Representação esquemática do reômetro rotacional.	96
Figura 43 – Fluxograma da rede de relacionamento e parcerias.	99
Figura 44 – Centrífuga de decantação.	100
Figura 45 – Fluxograma para o beneficiamento do cascalho.	101
Figura 46 – Teste de consistometria da pasta de cimento padrão (pasta sem cascalho em sua composição), utilizando a batelada de cimento 130.	107
Figura 47 – Teste de consistometria da pasta de cimento (batelada-130) com 10% de cascalhos.	109
Figura 48 – Teste de consistometria da pasta de cimento (batelada-127) com 10% de cascalhos.	110
Figura 49 – Teste de consistometria da pasta de cimento (batelada-129) com 10% de cascalhos.	110
Figura 50 – Teste de resistência compressiva da pasta de cimento padrão (pasta sem cascalho em sua composição), utilizando a batelada de cimento 130.	114
Figura 51 – Teste de resistência compressiva da pasta de cimento (batelada-130) com 10% de cascalhos.	115
Figura 52 – Teste de resistência compressiva da pasta de cimento (batelada-127) com 10% de cascalhos.	115
Figura 53 – Teste de resistência compressiva da pasta de cimento (batelada-129) com 10% de cascalhos.	116
Figura 54 – Configuração típica de revestimentos em poços terrestres	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Exemplo de composição de um fluido de perfuração catiônico.....	35
Quadro 02 – Composição típica de um fluido de perfuração a base de n-parafina.....	36
Quadro 03 – Sistema de controle de sólidos de uma sonda de perfuração.....	40
Quadro 04 – Premissas adotadas no projeto.....	118
Quadro 05 – Materiais permanentes e equipamentos.....	119
Quadro 06 – Obras e instalações.....	120
Quadro 07 – Serviço terceirizado.....	120
Quadro 08 – Despesas correntes anuais com pessoal.....	120
Quadro 09 – Despesas correntes anuais com transporte.....	120
Quadro 10 – Despesas correntes anuais com materiais de consumo.....	121
Quadro 11 – Comparativo de uma associação versus uma empresa prestadora de serviço. ..	124
Quadro 12 – Ações de sustentabilidade para a implantação do projeto de beneficiamento do cascalho.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição dos cascalhos de perfuração.....	39
Tabela 02 – Classificação dos solos de acordo com sua granulometria.....	40
Tabela 03 – Especificações do Cimento Portland Classe G, de acordo com a norma NBR-9831 e Cimento Portland Especial (Pastas Puras).	50
Tabela 04 – Formulação da pasta de cimento selecionada, sem cascalhos em sua composição.	105
Tabela 05 – Formulação da pasta de cimento selecionada, com 10% de cascalhos em sua composição.	105
Tabela 06 – Testes de consistometria das pastas avaliadas no LabCim/UFRN.	106
Tabela 07 – Parâmetros reológicos da pasta de cimento avaliada.....	112
Tabela 08 – Propriedades reológicas das pastas de cimento selecionadas, com 10% de cascalhos na composição.	112
Tabela 09 – Testes de resistência compressiva das pastas avaliadas no LabCim/UFRN.	116
Tabela 10 – Estabilidade das pastas de cimento avaliadas, com 10% de cascalhos em suas composições.....	117
Tabela 11 – Avaliação econômica da associação, em 04 anos.....	123
Tabela 12 – Avaliação econômica da associação, em 2,25 anos.....	125
Tabela 13 – Licença ambiental ou renovação (Portaria interministerial No 812, de 29 de setembro de 2015).....	127

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ADEMA	Administração Estadual do Meio Ambiente.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
API	Instituto Americano de Petróleo.
ARS	Alta resistência a sulfatos.
ASME	Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos.
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais.
ATAP	Alta temperatura e alta pressão.
BTAP	Baixa temperatura e alta pressão.
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello.
CIF	Cost, Insurance and Freight (Custo, Seguro e Frete).
CPP	Cimento Portland Poty Especial para poços de petróleo.
CTC	Centro de tratamento de cascalhos.
DP	Tubo de perfuração.
ETC	Estação de tratamento de cascalhos.
FOB	Free on Board (Livre a bordo – custo do equipamento entregue no local do fabricante ou escolhido por este).
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
IR	Imposto de Renda.
ISO	Organização Internacional de Normalização.
LabCim	Laboratório de Cimentos da UFRN.
LE	Limite de escoamento (valores fornecidos em $\text{lb}_f/100\text{pés}^2$).
LT	Lucro Tributável.
MRS	Média resistência a sulfatos.
NBR	Norma Brasileira aprovada pela ABNT.
NTCPP	Núcleo tecnológico em cimentação de poços de petróleo.
ONG	Organização Não Governamental.
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua
PNRS	Política nacional de resíduos sólidos.
PRODEMA	Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

TIR	Taxa Interna de Retorno.
TMA	Taxa Mínima de Atratividade.
UCA	Analizador de cimento ultrassônico.
UO-SEAL	Unidade de Operações de Exploração e Produção de Sergipe e Alagoas, pertencente à Petrobras.
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
UFS	Universidade Federal de Sergipe.
VP	Valor Presente.
VPL	Valor Presente Líquido.

LISTA DE SÍMBOLOS

FC	Fluxo de caixa.
FC0	Fluxo de caixa no início do projeto.
FC1	Fluxo de caixa no 1º. período do projeto.
FC2	Fluxo de caixa no 2º. período do projeto.
FC3	Fluxo de caixa no 3º. período do projeto.
FC4	Fluxo de caixa no 4º. período do projeto.
G_i	Gel inicial (valores fornecidos em $\text{lb}_f/100\text{pés}^2$).
G_f	Gel final (valores fornecidos em $\text{lb}_f/100\text{pés}^2$).
IL	Índice de lucratividade.
IR	Imposto de renda.
k'	Índice de consistência ($\text{lb}_f \cdot \text{s}^n/\text{pé}^2$).
LE	Limite de escoamento.
LT	Lucro tributável.
n'	Índice de comportamento.
OD	Diâmetro externo da tubulação.
Rpm	Rotação por minuto.
TIR	Taxa interna de retorno.
TMA	Taxa mínima de atratividade.
TOG	Teor de óleos e graxas.
VHF	Frequência muito alta.
VP	Viscosidade plástica (valores fornecidos em centipoise, cuja sigla é cP).
VPr	Valor Presente.
VPL	Valor presente líquido.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Objetivo Geral.....	27
1.2 Objetivos Específicos.....	28
2 REFERENCIAL TEÓRICO E DE CAMPO.....	29
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	32
3.1 A indústria do petróleo e a implantação de políticas sustentáveis.....	32
3.2 Fluidos de perfuração.....	33
3.3 Cascalhos de perfuração.....	36
3.3.1 Granulometria.....	39
3.3.2 Métodos de tratamento.....	40
3.3.3 Métodos de descarte.....	45
3.4 Cimento para poços petrolíferos.....	49
3.5 Cimentação primária de um poço de petróleo.....	52
3.5.1 Cimentação primária convencional.....	53
3.5.2 Cimentação primária com tubulação de menor diâmetro (do tipo stinger).....	54
3.5.3 Cimentação primária multi-estágio.....	54
3.5.4 Cimentação reversa.....	54
3.5.5 Cimentação em alta pressão e alta temperatura.....	54
3.6 Ensaios laboratoriais.....	54
3.6.1 Resistência à compressão.....	55
3.6.2 Reologia.....	55
3.6.3 Densidade.....	55
3.6.4 Água livre.....	56
3.6.5 Filtrado.....	56
3.6.6 Consistometria.....	56
3.7 Pasta de cimento.....	56
3.7.1 Cimento Portland CPP – Classe Especial.....	57
3.7.2 Aceleradores.....	57
3.7.3 Retardadores.....	57
3.7.4 Estendedores.....	58
3.7.5 Redutores de fricção (ou dispersantes).....	58

3.7.6 Controladores de filtrado.....	58
3.8 Nova tecnologia com cimento geopolimérico para a cimentação de poços de petróleo.....	58
3.9 Redução do filtrado da pasta de cimento por nanopartículas de barita.....	60
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
4.1 Localização da área pesquisada.....	63
4.2 Materiais utilizados na pesquisa.....	64
4.3 Testes realizados em laboratório.....	65
4.3.1 Fluxograma de testes e equipamentos do laboratório de cimentação.....	65
4.4 Equipamentos empregados.....	66
4.4.1 Homogeneizador e parâmetro API.....	66
4.4.2 Condicionamento da pasta de cimento.....	67
4.4.3 Massa específica da pasta de cimento.....	68
4.4.4 Tempo de espessamento.....	69
4.4.5 Consistômetro pressurizado.....	70
4.4.6 Filtro prensa – perda de fluido estático – BTAP (baixa temperatura/alta pressão).....	72
4.4.7 Resistência à compressão.....	73
4.4.8 Teor de água livre.....	74
4.4.9 Estabilidade da pasta de cimento (sedimentação).....	76
4.4.10 Reologia.....	77
4.5 Metodologia.....	79
4.5.1 Amostragem do cascalho de perfuração.....	79
4.5.2 Tratamento do cascalho.....	79
4.5.3 Homogeneização e preparo da pasta de cimento.....	89
4.5.4 Testes de pastas de cimento.....	92
4.5.5 Consciência ambiental e cidadania.....	98
5 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	105
5.1 Avaliação técnica.....	105
5.1.1 Formulação.....	106
5.1.2 Massa específica.....	107
5.1.3 Tempo de espessamento (ou consistometria).....	107
5.1.4 Filtrado.....	112

5.1.5 Teor de água livre.....	112
5.1.6 Reologia.....	112
5.1.7 Resistência compressiva.....	114
5.1.8 Estabilidade.....	117
5.2 Avaliação econômica.....	119
5.3 Gestão ambiental.....	128
5.4 Responsabilidade social.....	129
5.5 Condições dos poços avaliados.....	130
5.6 Propriedades físicas da pasta de cimento requeridas.....	131
6 CONCLUSÕES.....	132
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	134
8 REFERÊNCIAS.....	136

1 INTRODUÇÃO

A produção de petróleo gera dividendos financeiros de grande importância para os setores públicos e privados. As participações governamentais brasileiras no setor petrolífero atingiram, no ano de 2013, a impressionante cifra de R\$ 49,49 bilhões. São, aproximadamente, R\$ 50 bilhões de reais rateados entre diferentes esferas de governo (CUNHA et al., 2015). Apesar disso, a indústria petrolífera representa um sério problema de poluição ambiental. Ao longo das últimas décadas, esta indústria, nacional e internacional, tem empregado significativos recursos, sempre crescentes, no sentido de obstar danos ambientais e à saúde pública, em toda a sua cadeia produtiva. Em praticamente todas as etapas desta cadeia, desde a perfuração até a distribuição e transporte de derivados, promove-se a geração de resíduos oleosos de diversos tipos, ficando por conta das refinarias a maior parte destes. Dentre os vários efluentes produzidos na cadeia produtiva, os resíduos de maior destaque são: o solo contaminado por óleo com outras substâncias (originados na perfuração), a borra oleosa gerada na atividade de refino (como a que se origina no fundo do tanque de óleo cru), lodos oleosos, resíduos das torres de resfriamento e das torres de troca de calor. São todos materiais contaminantes que exigem uma destinação adequada.

O manejo e a disposição final dos resíduos de forma efetiva e responsável, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10, são fundamentais ao gerenciamento do risco ambiental na perfuração de poços de petróleo. O potencial dos resíduos provenientes das atividades industriais de petróleo em causar danos à saúde e ao meio ambiente pode ser minimizado quando um gerenciamento apropriado é implantado, de acordo com os representantes das principais operadoras internacionais de petróleo. Um gerenciamento eficiente dos resíduos pode reduzir os custos operacionais e os passivos ambientais decorrentes. O potencial de percepção, por parte de uma operadora, sobre os impactos ambientais resultantes das operações de perfuração, em uma determinada região, é a chave para o sistema de gerenciamento de resíduos a ser validado. Faz-se necessária a aquisição de informações sobre o ecossistema a ser afetado.

Embora residam nos derramamentos de petróleo, em ambientes terrestres ou marinhos, as maiores catástrofes ambientais, a atividade de exploração e produção de petróleo apresenta diversos outros riscos que lhe são inerentes, tais como a poluição de lençóis freáticos situados próximos à superfície, do solo e do ar, assim como a poluição relacionada aos grandes volumes de resíduos gerados, como os cascalhos, durante a perfuração de poços de petróleo.

No cenário atual, a oferta de petróleo vem aumentando devido ao crescimento da produção mundial, principalmente nas áreas de xisto (um substituto do petróleo) dos EUA – cuja produção tem se situado em níveis recordes nos últimos 30 anos – enquanto os grandes produtores vêm mantendo o nível de produção. Outro fator que, certamente aumenta a produção mundial e pressiona os preços, vem caindo desde junho de 2014, é a volta do petróleo do Irã ao mercado, visto que foram suspensas as sanções comerciais contra aquele país, como resultado de um acordo nuclear alcançado em 2015. De acordo com a Agência Internacional de Energia – AIE, aproximadamente 87% do combustível consumido no planeta é de origem fóssil.

Apesar das políticas públicas atuais no Brasil apoiarem o desenvolvimento sustentável, este último ainda jaz, na maioria das vezes, no nível do discurso, produzindo poucas ressonâncias na dimensão de práticas sociais. Embora ele carregue consigo considerável potencial de crítica e transformação da realidade, ainda carece de efetividade.

A necessidade crescente de conservação dos recursos naturais e dos espaços designados à ocupação humana requer a criação de soluções tecnológicas efetivas para a destinação final dos resíduos gerados nas diversas etapas de produção, minimizando de forma eficaz, os impactos ambientais (GANGHIS et al., 2009). Tais perspectivas trazem preocupações aos órgãos governamentais e à sociedade como um todo, visto que soluções tecnológicas eficazes geralmente estão associadas a custos elevados de implantação e manutenção das mesmas.

Por conseguinte, faz-se necessário que inovações tecnológicas sejam implantadas com o propósito de mitigar o impacto ambiental causado por essa indústria. Este projeto busca por soluções técnicas economicamente viáveis, ambientalmente apropriadas e socialmente justas, para o aproveitamento de resíduos gerados pela indústria do petróleo, especificamente o cascalho de perfuração.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), veiculada pela Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010, trouxe como uma das principais questões o tratamento do resíduo sólido, reutilizável e reciclável, transformando-o em um bem econômico de valor social. Esta transformação faz parte de um conjunto de procedimentos relacionados às práticas de consumo que ajudam a poupar os recursos naturais, gerar menos resíduos e minimizar o impacto sobre o meio ambiente, além de promover a geração de emprego e renda. Trata-se de ações práticas que visam estabelecer uma relação harmônica entre o homem e o meio ambiente.

O Estado, por sua vez, procura integrar os interesses públicos e privados através de incentivos fiscais e de fomento destinados aos que se propuserem ingressar na empreitada proposta por planos nacionais, estaduais e municipais de resíduos sólidos, a serem concedidos por agências estatais financeiras.

A política dos 3 R's (reduzir, reutilizar e reciclar) atua como orientação de uma das práticas mais necessárias ao equacionamento do tema dos resíduos sólidos e ao triunfo da PNRS. A política dos três R's e a dimensão econômica estão intimamente ligadas ao desenvolvimento sustentável (Figura 01), visto que reduzir a produção de resíduos é essencial para o progresso do desenvolvimento sustentável. Assim como o primeiro R, a reutilização ou o reaproveitamento também visa reduzir a produção de resíduos. Neste estudo, a utilização destes resíduos sólidos proporciona uma redução no consumo de cimento e aditivos de pastas de cimento. E por fim, a reciclagem, considerada a mais importante etapa para a sociedade atual.

Figura 01 – Política dos 3 R's



Fonte: GOOGLE, 2017.

A PNRS foi instituída e tem como um de seus objetivos, a gestão consciente do descarte dos resíduos sólidos e, assim, a diminuição dos impactos causados por estes, como por exemplo, os cascalhos gerados pela perfuração de poços de petróleo, aqui estudados. Ações igualmente relevantes da PNRS são:

- Intensificação de ações de educação ambiental;
- Promoção da inclusão social.

A PNRS procura desenvolver no país uma gestão adequada dos resíduos sólidos, em proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, prevendo para esta finalidade,

determinados instrumentos específicos, cujas aplicações apresentam-se como mecanismos típicos de uma nova racionalidade ambiental no processo de produção e gestão de resíduos sólidos no Brasil. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, dentre outros propósitos, visa instituir uma gestão integrada destes. Esta é compreendida como o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções destinadas aos resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável, com base na Lei Federal 12.305/2010, art. 3º, inciso XI, colaborando desta forma, com a implantação da racionalidade ambiental. Para implantá-la, assim como elaborar um método singular de crescimento, resulta na intensificação e elaboração de processos sociais, como por exemplo: a integração dos valores do ambiente com a ética individual, na norma jurídica dos atores sociais e econômicos, e nos direitos humanos. Esta política estabelece a responsabilidade compartilhada para os geradores de resíduos como: fabricantes, importadores, comerciantes, distribuidores, cidadãos e titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos, na logística reversa dos resíduos e nas embalagens pré-consumo e pós-consumo.

O Decreto nº 7.404/2010 estabeleceu, em seu art. 81, que linhas especiais de financiamento podem ser criadas por instituições financeiras federais, destinadas às cooperativas ou associações de materiais reutilizáveis e recicláveis, com o objetivo de aquisição de máquinas e equipamentos utilizados na gestão; atividades destinadas à reciclagem e ao reaproveitamento, bem como atividades de inovação e desenvolvimento relativas ao gerenciamento; e atendimento a projetos de investimentos em gerenciamento de resíduos sólidos.

O desenvolvimento sustentável presume interdisciplinaridade, visto que no seu aperfeiçoamento, consideram-se três temas relevantes para a sociedade no século XXI, que são: os aspectos ambientais, sociais e econômicos. A cooperação entre esses aspectos permeia a essência do desenvolvimento sustentável ou sustentabilidade, onde quer que ela seja empregada, tanto em nível governamental, como na sociedade civil. O consumo sustentável significa o fornecimento de serviços e produtos que preencham as necessidades básicas, proporcionando uma melhor qualidade de vida, ao mesmo tempo em que se diminui o uso de recursos naturais e de substâncias tóxicas, como as emissões de resíduos e de poluentes durante o ciclo de vida do serviço ou do produto, com a ideia de não se ameaçar as necessidades das gerações futuras (CUNHA et al., 2015). Outras dimensões do desenvolvimento sustentável podem ser utilizadas, como por exemplo, os aspectos culturais, políticos e tecnológicos.

A concepção de desenvolvimento sustentável foi apresentada na Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU), pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente, em abril de 1987. O principal resultado apresentado por esta comissão foi o “Relatório Nosso Futuro Comum”, conhecido como “Relatório *Brundtland*”, onde o desenvolvimento sustentável é retratado como “o desenvolvimento que preenche as necessidades do presente, sem comprometer a habilidade das gerações futuras de preencherem suas próprias necessidades” (QUELHAS et al., 2007).

Nas últimas décadas, o emprego de parâmetros voltados à avaliação da sustentabilidade ambiental, social e econômica nas corporações, vem crescendo de importância no Brasil e no mundo.

Desde a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o processo de logística reversa, utilizado como uma ferramenta para a sustentabilidade se tornou obrigatório para as seguintes redes:

- Pneus;
- Pilhas e baterias;
- Agrotóxicos, seus resíduos e embalagens;
- Produtos eletroeletrônicos e seus componentes;
- Óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens;
- Lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista.
- Produtos comercializados em embalagens plásticas, metálicas ou de vidro;

A logística reversa (Figura 02) incorpora diferentes protagonistas sociais na responsabilização do destino ambientalmente apropriado dos resíduos sólidos. Estabelece obrigações, especialmente do setor corporativo, de realizar o recolhimento do resíduo gerado, assim como assegurar seu reaproveitamento no mesmo ciclo produtivo ou garantir sua inclusão em outros ciclos produtivos.

Figura 02 – Logística reversa.



Fonte: SINQUIFARNP, 2012.

O aproveitamento de resíduos oriundos de processos industriais surge como uma alternativa atraente para a cadeia produtiva da indústria, uma vez que essa atividade pode resultar em dois importantes aspectos:

- A conservação dos recursos naturais, como o aproveitamento de resíduos já extraídos;
- A conservação do meio ambiente, evitando que os resíduos sejam inadequadamente, dispostos na natureza.

Além destes já mencionados, os resíduos poderão ter um valor agregado, invertendo a situação de custo e risco de poluição ambiental associado ao transporte e descarte realizados, em geração de renda nas fases de processamento e beneficiamento dos mesmos, transformando-os em matérias-primas que compõem uma pasta de cimento.

Administrar apropriadamente os resíduos produzidos, de forma a impedir o esbanjamento de energia e de materiais é um desafio. O acolhimento às condições das normas dos sistemas de gestão ambiental, não garante, por conseguinte, resultados ambientais satisfatórios. A gestão ambiental das empresas que atuam neste segmento é determinante, não só para a qualidade de seus serviços como, para sua imagem, pois apesar de todas as inovações tecnológicas disponíveis, a relevância dada à gestão ambiental é um fator decisivo para orientação de sua estratégia de desenvolvimento no século XXI. Para este fim, deve-se estabelecer o emprego da melhor tecnologia disponível, sempre que adequada e,

economicamente exequível (MARTINS, 2008). Desta forma, o impacto ambiental será menos relevante, e com um menor custo para a sociedade.

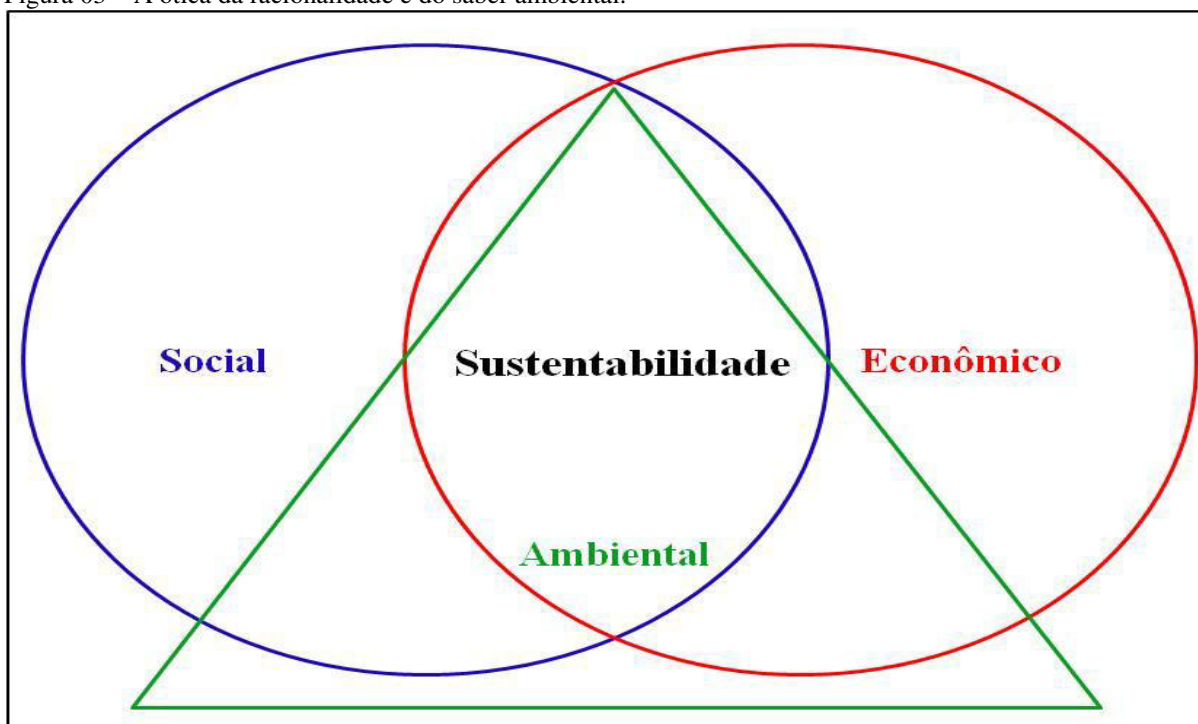
A pesquisa reveste-se de grande importância, tendo em vista que a atividade de perfuração mobiliza grandes volumes de fluidos e materiais sólidos aptos a promoverem a poluição do solo nas proximidades do poço perfurado e do local para onde são enviados em seu destino final, convertendo-se numa grande preocupação para os estudiosos do assunto.

Assegurar que todos os resíduos sejam gerenciados de forma apropriada e segura, desde a geração até a disposição final, é um grande desafio para as empresas. Visto que, todo esse processo, envolve etapas de geração, caracterização, manuseio, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final (MISSIAGGIA, 2013). A utilização de resíduos industriais deve ser encarada como uma prática conservacionista e ao mesmo tempo reparadora, com grande impacto ambiental e ecológico.

Este estudo visa reduzir o impacto ambiental provocado pela perfuração de poços, no âmbito dos campos terrestres de petróleo de Sergipe, como também reduzir o custo de cimentação dos poços, possibilitando desta forma, a geração de emprego e renda, através do processamento dos cascalhos.

Dentro de uma racionalidade culturalmente diversa, ecologicamente sustentada e socialmente justa, procura-se, através de soluções técnicas inovadoras, promover o crescimento econômico como um processo sustentável, fundamentado nos mecanismos de livre mercado, como meio eficaz de assegurar o equilíbrio ambiental. Quando se fala em equilíbrio ambiental, se expressa sobre o estado de um ecossistema onde a fauna e flora são relativamente constantes, mostrando assim uma relação de dependência e ajuste complexo entre as duas. No estudo ora apresentado, busca-se reforçar o entendimento do meio ambiente como base e condição material de qualquer possibilidade de desenvolvimento humano, promovendo a integração de todas as dimensões (social, ambiental e econômica) envolvidas na questão (Figura 03).

Figura 03 – A ótica da racionalidade e do saber ambiental.



Fonte: AUTOR, 2017.

A integração entre as dimensões acima mencionadas se dá através da comprovação da viabilidade técnica de uma pasta de cimento com cascalho de perfuração em sua composição, mantendo os parâmetros técnicos requeridos pela indústria petrolífera, proporcionando um custo menor da pasta de cimento para a operadora, bem como no tratamento e logística para o descarte do cascalho, como também apresentando à sociedade uma oportunidade para geração de emprego e renda no beneficiamento do cascalho, visto que o beneficiamento do cascalho proposto neste estudo não é realizado, até o momento por esta indústria. Estes cascalhos que compõem as pastas de cimento estariam retornando aos poços geradores dos mesmos, reduzindo assim o volume de resíduos e o impacto ambiental produzido por estes durante o transporte e o descarte em aterros controlados, por exemplo.

1.1 Objetivo Geral

Apresentar uma solução tecnológica para o aproveitamento dos cascalhos resultantes da perfuração de poços de petróleo, convertendo estes resíduos em matérias-primas, na composição de pastas de cimento, criando mecanismos e proporcionando oportunidades para a geração de emprego e renda, aumentando dessa forma a produtividade e a sustentabilidade das empresas empreendedoras.

1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma alternativa de pasta de cimento, utilizando o máximo teor de cascalho tecnicamente possível, em conformidade com os requisitos físico-químicos estabelecidos para a mesma pelas operadoras, resultando em um menor custo na logística realizada para o descarte do cascalho oriundo da perfuração dos poços de petróleo, bem como um menor custo relacionado à implantação de um aterro industrial.
- Preparar uma pasta de cimento de produção, com cascalho em sua composição, destinada a cimentações primárias de intervalos produtores, conforme o enquadramento técnico previamente especificado e determinado através dos seguintes testes laboratoriais:
 - a) Massa específica;
 - b) Reologia;
 - c) Filtrado;
 - d) Água livre;
 - e) Tempo de espessamento;
 - f) Estabilidade;
 - g) Resistência compressiva;
- Reduzir o volume de cascalho conduzido a aterro industrial ou a incinerador, ou ainda, injetado em formações no subsolo, como resultado direto da solução técnica apresentada.
- Diminuir o custo de tratamento do cascalho para as operadoras;
- Conter o custo de descarte do cascalho;
- Difundir nas empresas regionais que atuam no setor de petróleo, o caráter pedagógico desta prática educativa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E DE CAMPO

O número crescente de desempregados atingiu 14 milhões em maio de 2017, segundo os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Além disso, um em cada cinco brasileiros desempregados está, há dois anos ou mais, procurando trabalho. De acordo com a Organização Internacional do Trabalho (OIT), a cada 3 novos desempregados no mundo em 2017, um desempregado é brasileiro. O desemprego é apontado como resultado do mau funcionamento da econômica e não mais como uma fatalidade no nível do indivíduo. O pleno emprego é um objetivo concreto.

Uma ação racional do Estado, através de políticas públicas, visando à reorganização do mercado de trabalho, auxiliaria na aquisição, pelo cidadão, do pleno emprego reduzindo, desta forma, os desequilíbrios sociais existentes (MORETTO, 2007).

Em momentos de crises, como os atuais, com rígidas medidas fiscais para a contenção dos gastos públicos, as receitas petrolíferas devem contribuir com a implantação de políticas sustentáveis, por meio da geração de emprego e renda, assim como, devem reduzir os passivos ambientais resultantes das atividades industriais.

As receitas petrolíferas derivadas de tributos devem ser utilizadas como dádivas de toda a sociedade, assim como, geridas e direcionadas para investimentos produtivos, com propósitos longevos, como parte de “um processo de reestruturação social, através de uma transformação ambiental do conhecimento” (CUNHA et al., 2015).

Faz-se necessária a elaboração de estratégias e políticas centradas na solução da problemática ambiental e na geração de um desenvolvimento sustentável, fundamentado no aproveitamento integrado de recursos, como parte do plano de sobrevivência da sociedade.

A conscientização dos limites dos recursos naturais e energéticos pelo homem retoma a importância da redefinição do entorno e a revalorização do meio ambiente, como base da sustentabilidade. Deste modo, os paradigmas econômicos podem ser reformulados com a constatação da finitude (CUNHA et al., 2015).

Neste contexto ambiental, que deveria ser peculiar a todo ser humano, dispensar a atenção poderia ser uma prática diária, mas certamente não é suficiente. A criação de uma racionalidade ambiental desponta como um meio termo, com perspectiva de reorientar a produção e alavancar o desenvolvimento sustentável.

Uma verdadeira racionalidade ambiental possui o viés do paradigma da sustentabilidade como diretriz e limita a atuação humana. É basilar a difusão da pedagogia ambiental e a implantação de ações concretas, como a relatada a seguir.

Em 19 de abril de 2013, uma operadora de petróleo efetuou no município de Carmópolis/SE, uma cimentação primária em um intervalo intermediário (sem interesse econômico devido à ausência de hidrocarbonetos), através de um revestimento de 9 5/8"OD (24,5 cm de diâmetro externo da tubulação presente no poço e diâmetro do poço de 13 3/8"OD, ou seja, 34 cm de poço aberto), utilizando a sonda de perfuração convencional, com pasta de cimento contendo cascalhos processados no Centro de Tratamento de Cascalhos (Figura 04) e beneficiados (peneirados manualmente e misturados ao cimento) em sua composição. A massa específica da pasta de cimento empregada na época foi de 13,6 lb/gal, sem controle de filtrado.

Embora o resultado da cimentação tenha atendido às expectativas da operadora, o projeto não foi adiante devido ao fato de não haver na região, uma estrutura adequada ao beneficiamento dos cascalhos, e com uma logística compatível com as demandas operacionais.

As empresas contratadas pela operadora, prestadoras de serviços nacionais e internacionais, não demonstraram interesse neste projeto por não reconhecerem no mesmo, uma oportunidade para aumentar os seus lucros.

Apesar de a exploração do petróleo e a busca pelo sustentável parecerem aparentemente inconciliáveis, é possível divisar alguns enfoques possíveis para se pensar nas receitas advindas do petróleo, a partir dos influxos da racionalização ambiental.

Em benefício da sustentabilidade, faz-se necessária uma melhor aplicação dos investimentos, estimulando a adoção de medidas com maior eficiência energética, passando pelo fomento de atividades incentivadoras regionais com produtividade ecotecnológica, assim como a utilização de ferramentas de avaliação participativa, envolvendo a comunidade na decisão dos investimentos.

De acordo com Leff, a sustentabilidade se revela como “um critério normativo para reconstrução da ordem econômica, como uma condição para a sobrevivência humana e um suporte para chegar a um desenvolvimento duradouro, questionando as próprias bases da produção” (LEFF, 2008, p. 15 apud CUNHA, 2015).

Portanto, faz-se necessária a adoção de políticas públicas dentro de uma visão de desenvolvimento sustentável, visando o incremento de mecanismos de apoio e o assessoramento às organizações e parcerias público-privadas.

Figura 04 – Fluxo convencional dos cascalhos de perfuração.



Fonte: AUTOR, 2017.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo atual retrata os processos envolvidos na produção dos cascalhos, resultantes da perfuração de poços de petróleo, objeto deste estudo. Aqui são abordados todos os aspectos envolvidos na produção deste resíduo heterogêneo da indústria do petróleo, discorrendo desde a adoção de políticas sustentáveis, perpassando pelos fluidos de perfuração, cascalhos originários da perfuração, tipos de cimento empregados em poços petrolíferos, cimentação primária, ensaios laboratoriais e pasta de cimento.

3.1 A indústria do petróleo e a implantação de políticas sustentáveis

Em tempos de crises econômicas nacionais e internacionais, com a necessidade de adoção de medidas fiscais inflexíveis para conter e gerir melhor os gastos públicos, os recursos petrolíferos podem ser a salvaguarda para a implantação de políticas sustentáveis. A sustentabilidade é o reconhecimento da função básica da natureza de arrimo à vida (CUNHA et al., 2015).

Esta deve ser contemplada em todos os projetos de empreendimentos na atualidade, sobretudo no que diz respeito às atividades de reconhecido impacto ambiental, como as de exploração e produção de petróleo. Certamente, de agora em diante, isto será um desafio, visto que a dificuldade de manter o equilíbrio entre as necessidades indubitáveis de conservação do meio ambiente e de promoção do crescimento de recursos disponíveis, entre eles destacando-se a energia, cujo principal insumo, ainda é o petróleo.

Neste contexto, a atividade petrolífera é desenvolvida em circunstâncias cada vez mais limitantes do ponto de vista ambiental, sendo ininterruptos os projetos e investimentos em busca da sustentabilidade. Não impeditivo, o impacto ambiental da atividade é inelutável, haja visto que, notadamente, no caso brasileiro, as dificuldades de prospecção e exploração são crescentes, citando como exemplo, os novos empreendimentos que estão sendo projetados para perfuração de poços em lâminas d'água de até 3000 m.

Em cenários de crescimento da quantidade de reservas provadas, número de poços perfurados, e incremento na produção de petróleo, há um aumento na demanda por processos tecnológicos e matérias-primas necessárias à execução destas atividades. Porém, associado a este crescimento, está o aumento na geração de efluentes provenientes das operações de perfuração de poços. As técnicas ambientais corretas, retratadas na legislação ambiental, exigem que o gerenciamento dos efluentes tenha como meta, não somente a redução na produção, mas também o seu reaproveitamento, ao invés de descarte no meio ambiente.

3.2 Fluidos de perfuração

Na perfuração de um poço de petróleo, diferentes tipos de fluidos são utilizados nas diversas fases da perfuração. Os fluidos utilizados na perfuração de poços de petróleo são misturas de sólidos, líquidos, aditivos químicos, e/ou gases. Podem ter diferentes aspectos, dependendo do estado físico dos constituintes na mistura. Normalmente, nas fases iniciais perfura-se sem retorno, com água e argila, quando maiores densidades são requeridas, ou com água do mar (em poços marítimos). Nas fases seguintes, apresentam-se com aspectos de emulsões, suspensões, ou dispersões coloidais, dependendo de suas composições. São os principais responsáveis por toda contaminação sofrida pelo cascalho de perfuração ao ser retirado do poço.

De acordo com Van Dyke (2000), as mais relevantes atribuições dos fluidos de perfuração são:

- Sustentar as paredes do poço – o fluido de perfuração concede estabilidade hidráulica ao poço, através da pressão hidrostática produzida pelo fluido, necessária para evitar o colapso (desmoronamento) das paredes do poço. O controle das pressões internas do poço é efetuado pelo fluido de perfuração;
- Carrear o cascalho produzido pela broca, do fundo do poço à superfície – o fluido de perfuração tem a função de “limpar” o poço, ou seja, retirar os pedaços de rochas já triturados, da frente da broca, transportando o cascalho para a superfície;
- Garantir a segurança operacional e proteção ao meio ambiente – através do controle da pressão da formação, durante a perfuração, evitando situações de riscos operacionais que poderiam resultar em danos ambientais, entre outros;
- Minimizar problemas de torque e arraste – para reduzir o desgaste da coluna de perfuração;
- Lubrificar e resfriar a broca – com o propósito de reduzir o atrito e, conseqüentemente, o desgaste da broca;
- Evitar danos à formação produtora – sem formar, por exemplo, reboco junto à zona de interesse (produtora de hidrocarbonetos);
- Manter os sólidos em suspensão – a fim de evitar a sedimentação do cascalho durante a interrupção do bombeio;
- Inibir a reatividade de formações argilosas – não interagir com formações argilosas;
- Ser bombeável e quimicamente estável;
- Aceitar qualquer tratamento físico-químico;

- Apresentar uma baixa abrasividade em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos presentes no sistema de circulação do poço;
- Reduzir a corrosão da coluna de perfuração e dos equipamentos de superfície.
- Fornecer informações ao geólogo e ao engenheiro, a respeito das formações perfuradas – o cascalho e o fluido de perfuração que chegam à superfície constituem fontes de informações sobre as formações que estão sendo atravessadas;

A indústria do petróleo procura continuamente um fluido de perfuração ideal, ou seja, que forneça um bom desempenho no poço, que ofereça segurança em seu manuseio e de baixo custo. Nas últimas duas décadas, o atendimento às exigências ambientais passou a influenciar a escolha do fluido de perfuração que é utilizado na perfuração de poços de petróleo.

Estes fluidos se diferenciam quanto à sua base, que pode ser à base de água, óleo e ainda os chamados fluidos sintéticos. Diferentes bases de fluidos de perfuração podem ser empregadas em cada fase de perfuração de um mesmo poço.

Os três principais fluidos de perfuração empregados pela indústria são classificados como: fluido à base de água (composto por até 90% de água, argilas e aditivos poliméricos), fluido à base de óleo mineral (contém argilas, emulsificantes e outros aditivos) e fluido sintético. Este último é composto por ésteres, éteres, n-parafinas, polialfaolefinas e outros fluidos de emulsão inversa. Fluidos de perfuração com diferentes bases podem ser utilizados em cada fase de perfuração, no mesmo poço. Geralmente, em poços marítimos, as rochas-reservatório são perfuradas por fluidos, tecnicamente conhecidos, como “*drill in fluids*”. Tais fluidos devem ser preparados de modo a reduzir os danos à formação produtora.

Os fluidos catiônicos clássicos são os que mais se aproximam dos fluidos base óleo em relação à inibição. Mas a alta toxicidade dos polímeros catiônicos normalmente utilizados, custo elevado e a incompatibilidade com os aditivos poliméricos aniônicos presentes nos fluidos fazem com que tais fluidos sofram frequentes alterações em suas composições. O Quadro 01 retrata uma típica composição de um fluido de perfuração catiônico.

Quadro 01 – Exemplo de composição de um fluido de perfuração catiônico.

PRODUTO	FUNÇÃO
Água industrial	Fase contínua
Bicarbonato de sódio (NaHCO_3)	Removedor de cálcio e magnésio e estabilizador de pH
Goma xantana (TVGXT) - Biopolímero	Viscosificante
CMC ADS T-2 - Polímero hidrossolúvel	Redutor de filtrado
CMC AV AS - Polímero hirossolúvel	Viscosificante e encapsulante
Polímero catiônico	Inibidor de inchamento de argila
KCl	Inibidor de inchamento de argila
PRODUTO	FUNÇÃO
Triazina ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_3$)	Bactericida
Soda cáustica (NaOH)	Alcalinizante
Surfactante	Evita o encerramento de broca
Baritina (BaSO_4)	Adensante

Fonte: AUTOR, 2017.

Outro tipo fluido de perfuração não aquoso e bastante utilizado na perfuração de poços de petróleo, atualmente denominado por fluido de perfuração sintético, surgiu a partir da necessidade de um fluido que possuisse características semelhantes ao fluido à base de óleo, porém, que proporcionasse um menor impacto ambiental em relação ao fluido de perfuração à base de óleo.

O fluido de perfuração de base sintética é um composto orgânico sintético que possui a eficiência do fluido à base de óleo, porém, menos tóxico e mais biodegradável. É composto, principalmente, por ésteres e di-ésteres. Esse fluido foi desenvolvido como uma opção às restrições no desempenho do fluido à base de água, e em resposta às limitações ambientais exigidas ao fluido à base de óleo.

O fluido de perfuração sintético é designado também por SBF (*Synthetic Base Fluid*) ou SBM (*Synthetic Base Mud*), ou fluido de perfuração a base de compostos sintéticos, ou ainda, de “pseudo-fluido a base de óleo”, pois efetivamente o substitui, proporcionando uma menor toxicidade e produção de menor volume de resíduos da perfuração. A legislação ambiental vigente (Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010) é a força motora para o uso dos pseudo-fluidos sintéticos de perfuração e os secadores de cascalho.

Os fluidos sintéticos são derivados de reações químicas, nas quais o etileno é um exemplo de matéria prima. Nessa classe de fluidos têm-se as olefinas, os ésteres e as parafinas lineares sintéticas (ASME, 2005).

Em longos trechos perfurados, com ganho de ângulo, os fluidos sintéticos (Quadro 02) são normalmente utilizados, visto que estes concedem boa lubricidade e baixa reatividade em formações argilosas.

Quadro 02 – Composição típica de um fluido de perfuração a base de n-parafina.

PRODUTO	FUNÇÃO
N-Parafina	Fase contínua
Emulsificante primário	Emulsificante - mistura de ácidos graxos
Óxido de cálcio (CaO)	Alcalinizante
Solução saturada de cloreto de sódio (NaCl)	Fase emulsionada
Argila organofílica	Viscosificante
Viscosificante	Viscosificante derivado de ácidos graxos
Baritina (sulfato de bário - BaSO ₄)	Adensante

Fonte: FREITAS, 2013.

No estudo ora realizado, as amostras de cascalhos obtidas são resultantes de processos de separação para a remoção destes, efetuados com o fluido de perfuração sintético à base de parafina linear (parafina sintética conhecida como n-parafina¹), visto que esse tipo de fluido de perfuração é empregado durante a perfuração de poços terrestres, nas formações produtoras (zonas de interesse) em Sergipe, como a formação Muribeca (membro Oiteirinhos), analisada neste estudo.

3.3 Cascalhos de perfuração

A perfuração de poços de petróleo em terra é dividida em fases, geralmente duas a três, de acordo com a profundidade. Em cada uma delas, o diâmetro do poço vai diminuindo e gerando um menor volume de resíduos por metro perfurado, e com diferentes contaminantes. Os contaminantes presentes nos cascalhos dependem da composição química do fluido de perfuração utilizado e da composição da formação rochosa. Nesses contaminantes incluem-se hidrocarbonetos, metais pesados e cloretos.

Um dos mais heterogêneos resíduos da indústria de petróleo é o cascalho de perfuração derivado da perfuração dos poços de petróleo. O cascalho de perfuração é classificado pela legislação brasileira, segundo a ABNT NBR 10004:2004, como sendo de classe II-A, portanto, não inerte e não perigoso (MENESES, 2014). A sua deposição em aterros industriais deve seguir a NBR-13.896/1997, que dispõe sobre “aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação”.

A solidificação de resíduos com altos teores de metais tóxicos, por meio da incorporação de cimento Portland e outros produtos inorgânicos é singularmente eficiente visto que, o pH da matriz do cimento contribui com a transformação dos cátions em hidróxidos e carbonatos insolúveis. Muitos íons metálicos podem ser anexados à estrutura cristalina da matriz de cimento.

Os cascalhos, derivados da perfuração de poços de petróleo, não são aditivos de pasta de cimento. A adição destes na composição de pastas de cimento dificulta o enquadramento

¹ N-parafina é um fluido composto por cadeias de hidrocarbonetos na faixa de C₁₃ a C₁₈.

técnico (água livre, filtrado, resistência compressiva, estabilidade, bombeabilidade e reologia) determinado pelas operadoras.

Destarte, busca-se neste estudo, viabilizar técnica, econômica e socialmente a utilização de pastas de cimento de produção, como meio para efetuar o descarte adequado destes resíduos, limitando desta forma, o impacto ambiental resultante do volume de cascalhos destinados a aterros controlados, por exemplo.

De acordo com as informações disponibilizadas pelas principais operadoras presentes no País, a estimativa média de produção de cascalho de perfuração, considerando a geometria dos poços terrestres perfurados no Brasil é de, aproximadamente, 5 m³ a cada 100 m de avanço de perfuração realizada (MI SWACO, 2009). Foram gerados 13.000 m³ de cascalho, em campos terrestres do norte do Estado do Espírito Santo, em 2010 (PAULA, 2010). Não obstante, a produção de cascalho proveniente da perfuração é um processo múltiplice, no qual está envolvido um conjunto de fatores que pode variar o volume de resíduos produzidos, assim como o seu grau de poluição.

Estima-se que na região Nordeste do Brasil exista atualmente, uma quantidade de resíduos da ordem de 100 mil m³ oriundos do processo de perfuração de poços para produção de petróleo.

O cascalho produzido no Brasil, em campos de petróleo *offshore*², é lançado ao mar, apesar de que, mundialmente há um entendimento de que cascalho de perfuração com mais de 1% de hidrocarboneto não deve ser direcionado ao mar. Já em relação ao cascalho originado em campos de petróleo *onshore*³, a prática relatada por empresas que atuam no Brasil, é constituída por um pré-tratamento, com o propósito de limitar o teor total de hidrocarbonetos a um máximo de 2% da massa de cascalhos de perfuração, para depois colocá-los em diques ou aterros.

Os aterros industriais utilizados para acomodação final do cascalho ficam afastados dos campos de petróleo, reduzindo o interesse econômico, além de aumentar o risco de contaminação durante o transporte do mesmo. Portanto, as empresas petrolíferas têm preferido colocar o cascalho, de uma forma provisória ou definitiva, em diques. Na maior parte dos casos, os diques são construídos nas adjacências dos campos petrolíferos e nem sempre sofrem o processo de impermeabilização de base, cobertura adequada e sistema de drenagem compatível, conforme demonstrado na Figura 05.

² *Offshore* – Fora da costa (marítimo).

³ *Onshore* – Terrestre.

Figura 05 – Dique de armazenamento provisório de cascalhos no campo de Carmópolis/SE.



Fonte: PUC-RJ, 2009.

Os cascalhos são fragmentos de rochas cortadas pela broca que são carreados pelo fluido de perfuração, do fundo do poço até a peneira vibratória (um dos equipamentos que compõem o sistema de tratamento e circulação do fluido de perfuração) localizadas na superfície (sonda de perfuração), onde são separados do fluido de perfuração e armazenados em tanques para, em seguida, serem transportados a centros de tratamento e descarte dos mesmos. São misturas de pequenos fragmentos de rochas saturadas com o fluido de perfuração utilizado para lubrificar e resfriar a broca, assim como manter os sólidos em suspensão durante a perfuração (LEONARD e STEGEMANN, 2010).

A composição química do cascalho é muito variada devido à heterogeneidade das formações atravessadas pela broca, assim como pela presença de contaminantes. Devido a não remoção total do fluido de perfuração impregnado nos cascalhos, geralmente estes contêm contaminantes que dependem da composição química utilizada no fluido de perfuração e da composição da formação rochosa essencialmente perfurada (FIALHO, 2012). A Tabela 01 revela os principais componentes químicos dos cascalhos, em percentagem. Al-Tabbaa (AL-TABBAA e STEGEMANN, 2005) sugere que o cascalho de perfuração possa ser classificado como um material heterogêneo, com concentrações significativas de hidrocarbonetos, metais pesados e sais solúveis em água.

Há possibilidade de se classificar o resíduo apenas em função de sua origem (corrente de geração) e características, sem realizar análises laboratoriais. No entanto, há que se ressaltar que as características físicas e químicas do cascalho são muito variáveis, uma vez

que são dependentes da geologia local, do fluido de perfuração utilizado, da técnica de perfuração adotada e do tipo de broca utilizado na perfuração.

Não obstante, os cascalhos serem definidos como sendo fragmentos grosseiros de rocha maiores que 2,0 mm de diâmetro, o presente estudo tem como objetivo empregá-los na composição da pasta de cimento. Para viabilizar tecnicamente o processo, faz-se necessário que haja uma maior fragmentação, aumentando assim, a área superficial total dos mesmos.

Tabela 1 – Composição dos cascalhos de perfuração.

DETERMINAÇÕES (%)	ABBE et al (2009)	PIRES (2009)	MEDEIROS (2010)	LEONARD E STEGEMAN (2010)	VALORES MÉDIOS
SiO ₂	47,60	43,96	36,50	60,40	47,12
Al ₂ O ₃	13,54	21,48	11,50	10,40	14,23
Fe ₂ O ₃	6,34	5,40	4,50	4,90	5,29
BaO	11,39	2,38	ND ⁴	ND	3,44
CaO	2,78	18,12	35,30	2,50	14,68
MnO	0,17	ND	0,09	0,06	0,08
MgO	2,31	ND	ND	2,00	1,08
K ₂ O	2,33	4,51	2,70	1,70	2,81
Na ₂ O	1,17	ND	ND	2,40	0,89
TiO ₂	0,65	ND	0,81	0,60	0,52
P ₂ O ₅	0,10	ND	ND	0,10	0,05

Fonte: FIALHO, 2012.

3.3.1 Granulometria

A granulometria ou análise granulométrica é um estudo da distribuição das dimensões dos grãos de um material particulado. É o termo usado para caracterizar o tamanho das partículas de um material. Trata-se da indicação das dimensões das partículas do agregado e dos seus respectivos percentuais de ocorrência.

A análise granulométrica caracteriza um conjunto de partículas de acordo com a sua distribuição de tamanho. Esta análise pode ser realizada por:

- Peneiramento, quando temos solos granulares como as areias e os pedregulhos. É realizada com peneiras padronizadas quanto à abertura das malhas e à espessura dos fios de que são feitas.
- Sedimentação, no caso de solos argilosos;
- Combinação de ambos os processos acima mencionados;
- Difração a laser;
- Imagem (fotografia e *software* de análise granulométrica).

⁴ ND – Não disponível.

As partículas de sedimentos variam muito de tamanho, desta forma, torna-se necessário e mais adequado dividir a amplitude dos tamanhos de grãos em uma série de classes ou intervalos.

No Brasil, segundo a ABNT NBR 6502/95, temos a seguinte classificação dos solos de acordo com sua granulometria, apresentada na Tabela 02.

Tabela 02 – Classificação dos solos de acordo com sua granulometria.

Classificação	Diâmetro dos Grãos (mm)
Bloco de rocha	$d > 1000$
Matacão	$200 < d \leq 1000$
Seixo	$60 < d \leq 200$
Grânulo	$2 < d \leq 60$
Areia grossa	$0,6 < d \leq 2$
Areia média	$0,2 < d \leq 0,6$
Areia fina	$0,06 < d \leq 0,2$
Silte	$0,002 < d \leq 0,06$
Argila	$d \leq 0,002$

Fonte: ABNT NBR 6502, 1995.

O peneiramento é tradicionalmente o método de análise mais utilizado para esta finalidade, uma vez que tanto o equipamento quanto o procedimento analítico e ainda os conceitos envolvidos, são relativamente simples. O método em questão consiste na separação de partículas, levando em consideração apenas o tamanho. No peneiramento industrial, os sólidos são colocados sobre uma superfície com um determinado tamanho de abertura. As partículas menores, ou finas, passam através das aberturas da peneira; as partículas maiores não.

3.3.2 Métodos de tratamento

Os métodos disponíveis para o tratamento são escolhidos de acordo com o grau de contaminação dos cascalhos, legislação local e decisão da empresa geradora. Após passar pelo tratamento primário (SCHAFFEL, 2002), composto por um sistema de controle de sólidos (Quadro 03) constituído por uma peneira vibratória onde os sólidos mais grosseiros são separados do fluido de perfuração.

Quadro 03 – Sistema de controle de sólidos de uma sonda de perfuração.

Equipamentos	O que se retira do fluido de perfuração
Peneira Vibratória	Sólidos grosseiros
Desaerador	Areia
Desiltador	Silte
Mud Cleaner ⁵	Partículas reaproveitáveis com as dimensões do silte
Centrífuga	Partículas que escaparam dos hidrociclones
Desgaseificador	Gases

Fonte: THOMAS et al., 2001.

⁵ Mud Cleaner – é um desiltador com peneiras.

Posteriormente, o fluido passa por um conjunto de hidrociclones, normalmente de dois a quatro hidrociclones, com cerca de 20 a 50 cm de diâmetro. A função de um hidrociclone é acelerar o processo de separação através da decantação de partículas de um fluido, nesse caso, basicamente a areia. O desarenador é um hidrociclone montado em baterias de seis a doze peças, para garantir uma vazão de circulação e separação adequadas às condições operacionais da sonda. Logo após, o fluido de perfuração passa por outro hidrociclone onde ocorre separação de partículas sólidas em suspensão, na faixa silte do fluido, denominado de dessiltador. A depender do poço, pode haver de oito a doze hidrociclones que separam partículas da faixa granulométrica do silte.

O fluido de perfuração, ao sair dos hidrociclones do dessiltador, ainda pode ser direcionado a um *mud cleaner*, que se trata de um conjunto de hidrociclones com uma peneira para recuperar partículas que retornarão ao fluido de perfuração, dispensando o acréscimo de mais aditivos ao fluido. Há *mud cleaners* que possuem uma centrífuga para retirar as partículas menores que ainda não tenham sido descartadas pelos hidrociclones.

Os equipamentos anteriormente mencionados compõem o sistema de controle de sólidos de uma sonda de perfuração. Após este processo, o fluido de perfuração volta a ser bombeado para o poço e o cascalho de perfuração é disposto em caçambas, para posterior transporte. As Figuras 06 e 07 apresentam o sistema de controle de sólidos do fluido de perfuração, presente em uma sonda. O grau de contaminação do cascalho é determinante para a aplicação (ou não) de técnicas complementares de tratamento.

Figura 06 – Sistema de controle de sólidos em uma sonda de perfuração.



Fonte: PIRES, 2009.

Figura 07 – Cascalho produzido após o processo de recuperação do fluido de perfuração.



Fonte: PIRES, 2009

A seleção de técnicas complementares de tratamento para destinação final e descarte dos cascalhos inclui processos como:

➤ Degradação biológica

Os cascalhos são dispostos no solo (Figura 08), na presença de ar, água e microorganismos de ocorrência natural, onde de maneira rápida, ocorre a biodegradação de óleo, mineral ou sintético, contido nos resíduos.

Figura 08 – Secagem do cascalho ao ar livre.



Fonte: Drilling Waste Management Information System Website, 2017.

É uma das técnicas contemporâneas de remediação que consiste na aplicação do resíduo oleoso na superfície do solo, de modo a reduzir as concentrações dos constituintes de petróleo por meio da biodegradação microbiana.

Processos como a degradação biológica, a incorporação na matriz do solo, a volatilização, a percolação e a lixiviação ocorrem assim que os resíduos são expostos sobre o solo. Essa técnica consiste no tratamento em que um componente orgânico do resíduo é degradado biologicamente, na camada superior do solo (15 a 20 cm), sendo necessário o fornecimento adequado de oxigênio (O₂) e nutrientes para os microrganismos aeróbicos. Baseia-se, sobretudo, na aeração do solo, para regeneração do oxigênio, manutenção do teor de nutrientes e de microrganismos aeróbicos na terra (JERÔNIMO et al., 2014).

➤ Compostagem

Trata-se de um processo utilizado para a distribuição e decomposição dos resíduos oleosos. Esses resíduos, juntamente com os fragmentos de rochas cortadas pela broca (cascalhos), são misturados ao solo e submetidos a uma biorremediação *in situ* (bioestimulação). A compostagem, como tratamento para resíduos da indústria petrolífera, passou a ser vista como uma opção interessante para aquelas localidades de poços de petróleo distantes dos centros de tratamento, onde o custo do transporte destes resíduos era considerado impeditivo. A compostagem apresenta algumas vantagens como: o tratamento pode ser feito no próprio local de geração dos resíduos, evitando assim o custo com a logística para a realização do descarte; os hidrocarbonetos contidos nos resíduos são degradados, eliminando o passivo ambiental; requer uma menor área para o tratamento como requerido pela técnica de degradação biológica; fornece um material estabilizado que pode ser utilizado na melhoria do solo, evitando o acúmulo de material tratado.

Contudo, algumas desvantagens estão ligadas ao processo como: a delimitação quanto ao teor de óleos e graxas menor que vinte e cinco por cento (TOG < 25%); a adição de nutrientes, com o objetivo de assegurar condições adequadas ao desenvolvimento da atividade microbiana aeróbia (OLIVEIRA, 2003).

➤ Solidificação e estabilização

Consiste em um tratamento prévio através do qual os componentes perigosos de um resíduo, como por exemplo, as areias contaminadas, são alteradas e preservadas nas suas formas menos solúveis ou menos tóxicas. O objetivo é melhorar as características físico-

químicas e de manejo, reduzir a área superficial através da qual ocorre a perda de contaminantes e delimitar a solubilidade dos constituintes perigosos contidos nos resíduos.

Na técnica, os resíduos tóxicos são mesclados com materiais que produzem uma matriz sólida impermeável, capturando e fixando desta forma, os resíduos dentro desta estrutura, e neste estudo em particular, a pasta de cimento endurecida. Os dispositivos utilizados nesta técnica de confinamento ou imobilização, podem ser físicos ou químicos ou físico-químicos (OLIVEIRA, 2003).

Na aplicação deste método, vários produtos podem ser empregados como: polímeros orgânicos, cal, cimento, materiais termoplásticos, materiais cerâmicos, materiais absorventes, além da técnica de vitrificação (OLIVEIRA, 2003).

➤ Reciclagem

É um processo de transformação de resíduos sólidos que resulta na alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas a convertê-los em matérias-primas ou novos produtos. A reciclagem consiste basicamente nas etapas de secagem, cominuição (menos de 1,0 mm de diâmetro médio do grão) e peneiramento.

➤ Coprocessamento

Fundamenta-se no reaproveitamento do cascalho através do coprocessamento deste resíduo em fornos de clínquer para fabricação de cimento. Os fornos de cal e cimento, devido às altas temperaturas de operação (1.400 °C ou mais), ao elevado tempo de residência dos gases e da alcalinidade do material, são excelentes equipamentos para a eliminação dos resíduos perigosos, particularmente os orgânicos halogenados. Todavia, nem todos os resíduos sujeitos à calcinação estão aptos a serem purificados em fornos de cimento. Os mais usuais são os líquidos com alto poder calorífico e baixo teor de sólidos, água e metais.

➤ Incineração

É um procedimento adotado para resíduos perigosos que não podem ser reciclados, triturados ou posto de forma segura em aterros controlados. A incineração de cascalhos constitui em etapa que precede o destino final a ser dado aos cascalhos, podendo servir de etapa de preparação, tanto para disposição em aterros industriais como para reciclagem.

Trata-se de uma queima controlada, na qual os materiais à base de carbono são reduzidos a gases e materiais inertes (cinzas e escórias de metal) com geração de calor. Esse processo possibilita a redução de 60% a 90% do peso e volume dos resíduos sólidos.

Geralmente, na incineração emprega-se de 10% a 25% de oxigênio em excesso, acima das necessidades de queima dos resíduos.

Refere-se a uma técnica de oxidação térmica na qual os resíduos perigosos são convertidos, por meio do oxigênio presente no ar, em gases e resíduos sólidos incombustíveis. Desta forma, este meio de tratamento integra métodos tais como: redução de volume e massa, detoxificação, inertização do resíduo e recuperação de energia (VISVANATHAN, 1996).

Os incineradores utilizados são queimadores de combustão em leito fluidizado e fornos com temperaturas de combustão de 800 a 900 °C. Durante o decurso da incineração, os principais problemas encontrados são: (1) emissões atmosféricas (gases e particulados); (2) alta temperatura do leito; (3) produção de clínquer; (4) temperatura elevada do fluxo de gás e (5) pressão em excesso (COSTA, 2010).

➤ Dessorção térmica

É muito utilizada no tratamento do cascalho de perfuração. Por ser menos destrutiva que a incineração, essa técnica é mais adotada. A temperatura de operação é de, aproximadamente, 400 °C. O cascalho é aquecido e os líquidos voláteis são expulsos, resultando em duas fases. A fase líquida, que contém água e óleo, é separada. Os sólidos produzidos no processo possuem normalmente, menos de 0,5 % de óleo em sua massa. Contudo, faz-se necessário mencionar que, nessa técnica, a salinidade e o teor de metais pesados (chumbo, bário, zinco etc.) mantêm-se com os sólidos.

O aquecimento do resíduo causa a sua descontaminação na dessorção térmica, assim como auxilia na recuperação do óleo adsorvido ao resíduo. Na maioria dos casos, após processo de dessorção térmica, o resíduo tratado pode ser destinado a um aterro controlado ou ser reutilizado, que é o que se pretende viabilizar neste projeto.

3.3.3 Métodos de descarte

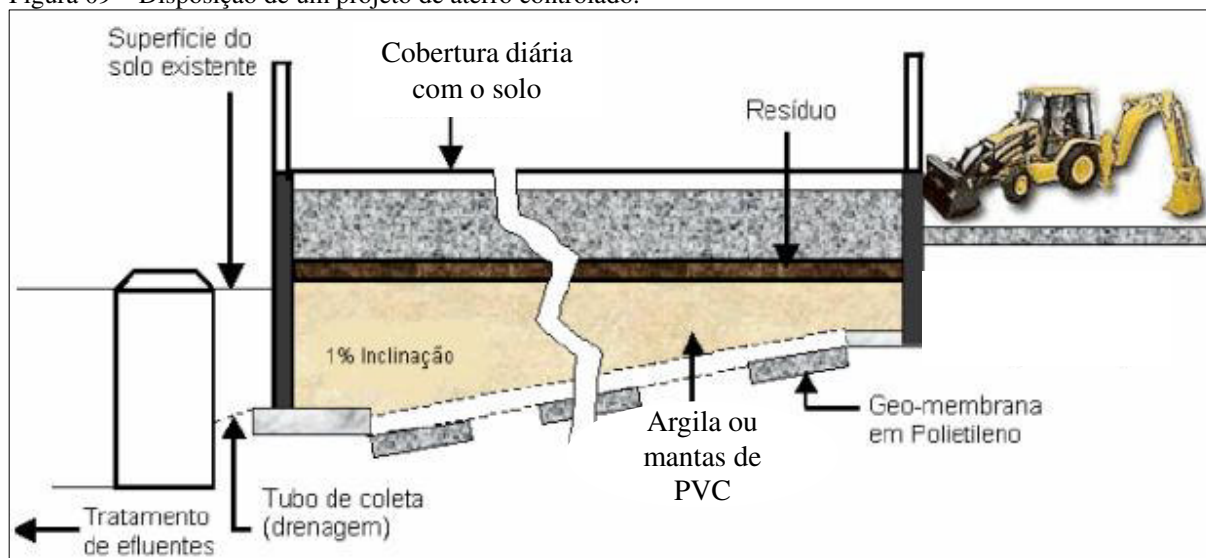
Nos últimos vinte anos, estudos têm sido realizados para avaliar o destino e os efeitos da descarga de cascalhos. Os elementos desses estudos, com custos relevantes, incluem a caracterização da composição, o volume dos efluentes, a avaliação dos potenciais efeitos de descarga e o monitoramento de campo ou área de descarte. Os métodos mais comuns de descarte dos cascalhos praticados pela indústria petrolífera são:

▪ Aterro controlado

O aterro controlado (Figura 09) é concebido com uma impermeabilização de fundo com argila ou mantas de PVC, para evitar a contaminação do solo e da água presente no

subsolo. Dessa forma, com essa impermeabilização do solo, o lençol freático não será contaminado pelo chorume. A parte superior do aterro controlado também é impermeabilizada, mesmo durante a sua fase de operação, recebendo uma cobertura final ao término da capacidade volumétrica do mesmo. É dotado de um sistema de drenagem superficial para evitar a contaminação do meio físico.

Figura 09 – Disposição de um projeto de aterro controlado.



Fonte: AUTOR, 2017.

▪ Injeção

A injeção dos cascalhos em poços de descarte é uma inovação tecnológica desenvolvida pelas principais operadoras da indústria do petróleo, para a realização do descarte de resíduos sólidos e líquidos, tratados ou não, em formações geológicas situadas abaixo dos aquíferos de água potável, desde que os sólidos e líquidos não entrem em contato com nascentes, por meios naturais ou induzidos pelo homem. As formações destinadas à recepção desses resíduos geralmente são rochosas e permeáveis, a centenas de metros de profundidade, em bacias geológicas confinadas por camadas impermeáveis ou de baixa permeabilidade como os folhelhos e, naturalmente, não fraturáveis.

Os cascalhos removidos do poço perfurado, após serem retidos na peneira de separação de sólidos e líquidos, são conduzidos para uma unidade trituradora, onde são fragmentados de forma a atingirem um tamanho uniforme e compatível com o transporte dos mesmos (de 0,5 a 1,0 mm de diâmetro). Posteriormente, são mesclados a um líquido (fluido de perfuração, fluidos viscosos à base de polímeros ou água) que lhes concederão propriedades reológicas apropriadas à manutenção da fluidez e dos resíduos em suspensão, durante a operação de injeção.

A seleção das formações que irão acumular estes cascalhos é um cuidado que deve ser adotado, pois a geometria e dimensão das fraturas são fundamentais para minorar os riscos ambientais associados com essas operações. É muito importante efetuar uma previsão de geometria da fratura, com certo grau de exatidão, para assegurar que haja uma disposição de resíduos, dentro de limites seguros com relação aos aquíferos, às falhas e aos outros poços na vizinhança.

Tais formações deverão possuir boa permeabilidade e possuir uma baixa pressão de fratura da formação a fim de suportar o volume a ser injetado. Trata-se de um método com aplicação limitada. Em alguns estados dos Estados Unidos da América, como Texas e Louisiana, há requisitos na legislação desses estados para a realização da injeção de cascalhos no subsolo como, por exemplo, a profundidade de injeção dos mesmos em poços de descarte, tipos específicos de formações a serem fraturadas e a distância desses poços às formações contendo aquíferos de água doce.

- Aterro industrial para resíduos de classe I - Perigosos

Em conformidade com Veil et al. (2002), Chen et al. (2007) relata que o tratamento mais utilizado para o cascalho produzido em terra, na maioria dos países produtores de petróleo, é a sua disposição em aterros controlados para resíduos sólidos perigosos. A gestão desse resíduo industrial tem um custo elevado para a indústria e a sua aplicação como matéria-prima em outro processo desta mesma indústria, tende a diminuir este custo, conforme proposto neste estudo. No Brasil, por muito tempo era comum o emprego de diques enterrados para destinação final do cascalho, próximo aos poços perfurados. O cascalho não recebia nenhum tratamento preliminar para diminuir o grau de contaminação. Esses diques enterrados são considerados passivos da indústria nacional de petróleo. Não há registro exato sobre a localização desses diques, assim como a quantidade existente dos materiais enterrados. Na atualidade, em atividades terrestres de perfuração no Brasil, adota-se como principal solução, a destinação do resíduo de perfuração para aterro controlado de resíduos perigosos. A Figura 10 apresenta a central de resíduos do Alto de Jericó, onde são lançados resíduos procedentes de poços perfurados pela Petrobras, no campo de Carmópolis, no estado de Sergipe.

Figura 10 – Central de resíduos do Alto de Jericó – Sergipe.



Fonte: PIRES, 2009.

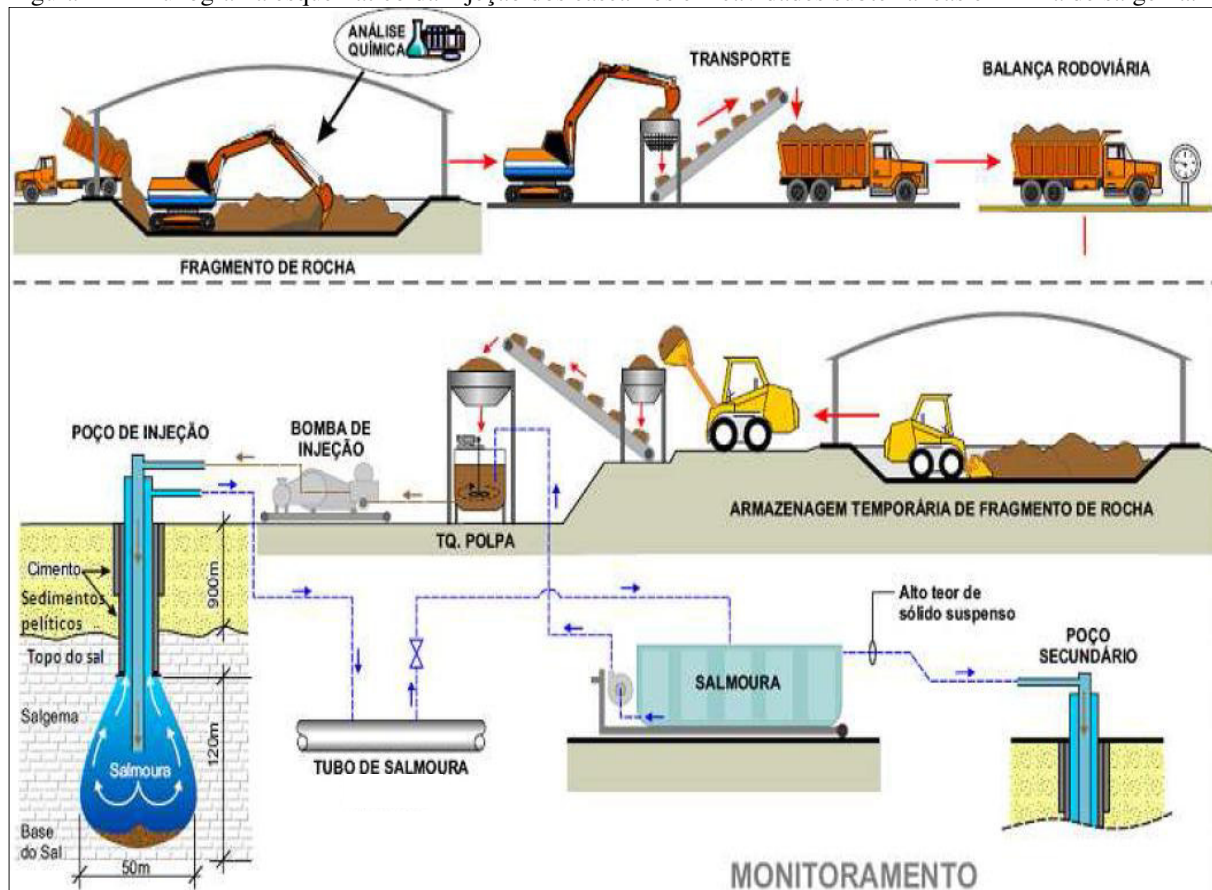
- Armazenamento em cavernas de sal

Outra opção avaliada para a destinação dos resíduos de cascalhos de perfuração é a sua disposição em cavidades subterrâneas de minas de salgema abandonadas. O emprego de minas subterrâneas abertas por dissolução em maciços evaporíticos para acúmulo seguro de resíduos e rejeitos industriais tem sido largamente praticado em países como o Canadá e os Estados Unidos, onde os critérios de controle ambiental estão entre os mais rigorosos do mundo. O processo de injeção está representado na Figura 11.

Os cascalhos descartados em aterro controlados, oriundos da estação de tratamento, são submetidos à análise química para a determinação de sua composição. Em seguida, são colocados em caminhões basculantes e pesados em balanças rodoviárias. Posteriormente, são transportados até os poços de sal, a fim de iniciar os preparativos para a injeção destes. Com os cascalhos posicionados na locação de um determinado poço de sal, estes são misturados a uma salmoura saturada e bombeados por uma tubulação instalada no referido poço para este fim que, em seguida, retorna à superfície pelo espaço anular existente entre a tubulação e as paredes do poço. Devido ao fato da área de fluxo do anular ser bem maior que a área de fluxo da tubulação (coluna) de injeção, a velocidade de retorno do fluido no anular é bem menor, o que proporciona uma decantação acentuada dos cascalhos para o fundo do poço. Os cascalhos remanescentes, em suspensão no fluido, são direcionados para um tanque de salmoura

saturada com um alto teor de sólidos e, em seguida, reinjetados em outro poço de sal, empregando o mesmo procedimento adotado no poço de sal anterior.

Figura 11 – Fluxograma esquemático da injeção dos cascalhos em cavidades subterrâneas em mina de salgema.



Fonte: GANGHIS et al., 2009.

Desta forma, o cascalho é depositado na base da caverna subterrânea, de configuração geralmente cilíndrica, com seção transversal de até 50 m de diâmetro e 120 m de altura, situada entre 850 m e 1.000 m de profundidade, abaixo de um denso pacote de rochas sedimentares formadas, intercaladas por camadas de folhelho (GANGHIS et al., 2009).

3.4 Cimento para poços petrolíferos

O cimento utilizado em poços de petróleo é uma modificação do cimento Portland, com baixo teor de aluminato tricálcico (C_3A), conhecido como celita, com grãos maiores que outros cimentos Portland comuns.

O cimento utilizado em poços de petróleo deve possuir maior uniformidade, propriedades físico-químicas mais controladas, maior compatibilidade com aditivos, estabilidade térmica até 500 °C, baixa cinética de hidratação (quanto maior o teor de celita na composição do cimento, maior será a cinética de hidratação do cimento), teores dos principais componentes coerentes com as especificações da ABNT e melhor estabilidade no

armazenamento, a fim de conservar propriedades como: a capacidade de suportar altas temperaturas, pressões e resistência a ambientes corrosivos.

Nas operações de cimentação dos revestimentos de poços petrolíferos brasileiros, os tipos de cimento normalmente utilizados são:

- Cimento Portland CPP-Classe G;
- Cimento Portland Composto CP-II-F-32;
- Cimento Portland Composto CP-II-E-32;
- Cimento Portland CPP-Classe Especial.

De acordo com a NBR-9831, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), de julho de 1993, os Cimentos Portland CPP - Classes G e Especial, podem ser definidos como sendo um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio hidráulicos, que apresenta características especiais para a utilização em poços de petróleo, até a profundidade vertical de 2440 m (Classe G), assim como produzido. A adição de gesso neste cimento é facultada durante a moagem.

Os requisitos físico-químicos para o Cimento Portland CPP-Classe G e para o Cimento Portland CPP-Classe Especial, encontram-se descritos na Tabela 03 (ABNT NBR 9831, 2008).

Tabela 03 – Especificações do Cimento Portland Classe G, de acordo com a norma NBR-9831 e Cimento Portland Especial (Pastas Puras).

ESPECIFICAÇÃO DOS ENSAIOS	CIMENTO PORTLAND CPP-CLASSE G	CIMENTO PORTLAND CPP- CLASSE ESPECIAL	UNIDADES
REQUISITOS FÍSICOS			
Teor de água, % em peso de cimento.	44	46	%
Finura # 325	-	17,5 – 20,5	%
Tempo de espessamento a 52°C (~125°F)	90 – 120	90 – 120	mín.
Consistência em 15-30 min	máx. 30	máx. 30	Bc
Resistência à compressão, 8h a 38°C	mín. 300	mín. 300	Psi
Resistência à compressão, 8h a 60°C	mín. 1500	mín. 1500	Psi
Água Livre	máx. 3,5	máx. 3,5	mL
REOLOGIA a 27°C (~80°F)			
Viscosidade Plástica	máx. 55	máx. 55	cP
Limite de Escoamento	30 – 70	30 – 70	lb _f /100pé ²
Gel Inicial	máx. 25	máx. 25	lb _f /100pé ²
Gel Final	máx. 35	máx. 35	lb _f /100pé ²
Consistência a 1 min	máx. 20	máx. 20	lb _f /100pé ²
Consistência a 5 min	máx. 20	máx. 20	lb _f /100pé ²

Continua

Continuação

ESPECIFICAÇÃO DOS ENSAIOS	CIMENTO PORTLAND CPP-CLASSE G	CIMENTO PORTLAND CPP- CLASSE ESPECIAL	UNIDADES
REOLOGIA a 52°C (~125°F)			
Viscosidade Plástica	máx. 55	máx. 55	cP
Limite de Escoamento	30 – 80	30 – 80	lb _f /100pé ²
Gel Inicial	máx. 25	máx. 25	lb _f /100pé ²
Gel Final	máx. 35	máx. 35	lb _f /100pé ²
Consistência a 1 min	máx. 20	máx. 20	lb _f /100pé ²
Consistência a 5 min	máx. 20	máx. 20	lb _f /100pé ²
REQUISITOS QUÍMICOS	MRS/ARS		
Óxido de magnésio (MgO)	máx. 6	máx. 6	%
Trióxido de enxofre (SO ₃)	máx. 3	máx. 3	%
Perda ao fogo	máx. 3	máx. 2	%
Resíduo insolúvel	máx. 0,75	máx. 0,75	%
Cal Livre	máx. 2	máx. 1,5	%
Silicato tricálcico (C ₃ S)	48 a 58 / 48 a 65	55 a 65	%
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	máx. 8 / máx. 3	máx. 7	%
2 C ₃ A + C ₄ AF	- / máx. 24	máx. 24	%
Conteúdo alcalino total (Na ₂ O equivalente)	máx. 0,75	máx. 1,0	%

Fonte: ABNT NBR 9831, 2008.

O cimento Portland composto, de uso corrente na construção civil, tem sua utilização restrita em poços de petróleo, sendo empregado apenas nas cimentações até a profundidade de 2000 m ou na temperatura de circulação de fundo de poço, de até 82 °C. Acima desta temperatura, em poços de petróleo, deve-se utilizar o cimento Portland CPP-Classe G e aditivos que retardem a pega da pasta de cimento, conforme o enquadramento técnico determinado pela operadora.

As principais matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento Portland são: calcário, argila e eventualmente algum minério contendo óxido de ferro ou alumínio, caso estes óxidos não estejam presentes na argila em teores consideráveis. Em seguida, tais produtos são dosados apropriadamente, e são pulverizados em moinhos de bolas, em condições secas (processo por via seca) ou misturados com água (processo por via úmida). Devido ao menor consumo energético em sua fabricação, no Brasil, todos os cimentos da Classe G e a maioria dos cimentos do tipo Portland Comum são produzidos pelo processo por via seca. A mistura crua seca pulverizada, denominada de “farinha”, alimenta o forno rotativo inclinado. A farinha é aquecida no forno em temperaturas entre 1400 e 1600 °C, obtendo-se o clínquer, um material pelotizado de granulação variável (SILVA, 2002).

O clínquer é, predominantemente, composto por quatro fases mineralógicas. São elas: silicato tricálcico (C₃S = Ca₃SiO₅), silicato bicálcico (C₂S = Ca₂SiO₄), aluminato tricálcico (C₃A = Ca₃Al₂O₆) e ferro aluminato tetracálcico (C₄AF = 2Ca₂AlFeO₅). Em menores proporções contêm, distribuídos nas fases acima elencadas, o óxido de cálcio livre (CaO),

óxido de magnésio (MgO), óxido de potássio (K_2O), óxido de sódio (Na_2O) e trióxido de enxofre (SO_3). A cal livre corresponde ao óxido de cálcio que não contribuiu na formação das quatro fases principais. O SO_3 contido no clínquer é proveniente do enxofre do combustível. Após o resfriamento, o clínquer é moído juntamente com o gesso (gipsita = $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), no caso do cimento Classe G, em uma temperatura mais baixa possível, a fim de evitar a formação do sulfato de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), de acordo com a norma NBR-9831. O processo de fabricação do cimento compreende das seguintes etapas:

- Seleção de matérias-primas como: calcário, argila, areia e minério de ferro;
- Extração, britagem e transporte de calcário;
- Pré-homogeneização do calcário;
- Dosagem das matérias-primas;
- Secagem e homogeneização de cru;
- Homogeneização da farinha crua;
- Pré-aquecimento e pré-calcinação da farinha;
- Clinquerização;
- Resfriamento do clínquer;
- Transporte e armazenagem do clínquer;
- Moagem do clínquer e adições;
- Armazenamento do produto acabado;
- Expedição.

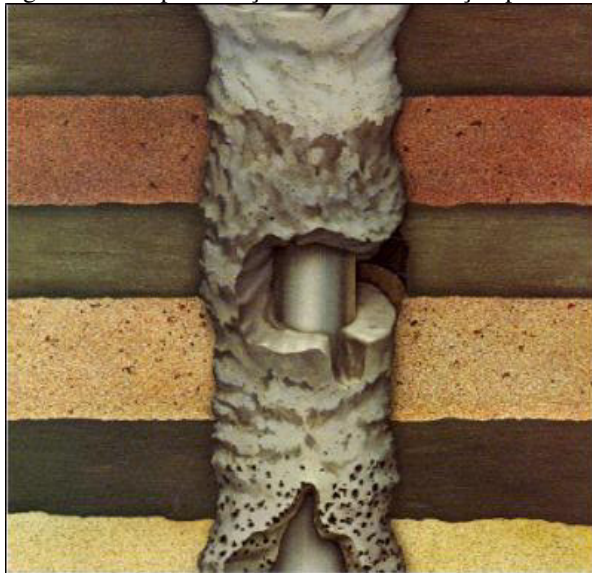
3.5 Cimentação primária de um poço de petróleo

É a principal cimentação realizada em um poço de petróleo. A pasta de cimento, ou simplesmente pasta, é a mistura de cimento ou mistura seca⁶ (cimento com aditivo em pó), água doce e/ou do mar e aditivos. Esta é preparada e bombeada (Figura 12) para o interior do poço, sem contaminação da pasta (sem contato com o fluido de perfuração), logo após a descida da coluna de revestimento no poço. O bombeio é executado pelo interior da coluna de revestimento, permitindo que a pasta de cimento seja posicionada no espaço anular entre o poço (formação) e a coluna de revestimento que, após atingir resistência compressiva, oferece fixação e vedação eficiente e permanente deste anular. Trata-se da cimentação realizada imediatamente após a descida no poço, da coluna (conjunto de tubos conectados um ao outro) de revestimento. Os propósitos da cimentação primária em um poço de petróleo são:

⁶ Mistura seca - é a mistura homogênea de cimento com quaisquer componentes sólidos.

- Promover aderência mecânica entre o revestimento e a formação;
- Isolar o fluxo de fluidos entre formações distintas;
- Proteger o revestimento contra corrosão e cargas mecânicas originadas das operações em seu interior.

Figura 12 – Representação de uma cimentação primária.



Fonte: PAULA, 2010.

A qualidade de uma cimentação primária é verificada por meio de perfis acústicos que são corridos por dentro do revestimento, após a pega do cimento. O equipamento mais utilizado para verificação da qualidade tem dois elementos básicos:

- Um transmissor, que recebe energia elétrica a cabo proveniente da superfície, a transforma em energia mecânica, e emite pulsos acústicos.
- Dois receptores registram as vibrações emitidas pelos pulsos sonoros.

O princípio de funcionamento se baseia na medida da atenuação acústica entre os sinais emitidos e os recebidos. A maior qualidade da cimentação, ou seja, melhor aderência está diretamente relacionada a uma maior atenuação acústica. A cimentação primária pode ser realizada por cinco formas (ou cenários) distintas. São elas:

3.5.1 Cimentação primária convencional

Trata-se da forma mais largamente utilizada, na qual a pasta de cimento é injetada no revestimento desde a superfície e deslocada descendentemente até a sapata (nome que se dá à ponta de uma coluna de tubos de revestimento, no fundo do poço) e retornando através do espaço anular. O objetivo desta cimentação é fixar a tubulação e evitar que haja migração de fluidos entre as diversas zonas permeáveis atravessadas pelo poço, por detrás da tubulação de

revestimento. A cimentação do espaço anular é realizada por meio da pasta de cimento. A cimentação primária é executada após a descida de cada coluna de revestimento no poço.

3.5.2 Cimentação primária com tubulação de menor diâmetro (do tipo *stinger*)

Quando a cimentação requer um grande volume de pasta de cimento, o que significa também um maior tempo de deslocamento, a operação pode ser realizada através de uma tubulação de menor diâmetro (CAMPOS et al., 2002). Normalmente, utiliza-se uma coluna de tubos de perfuração denominados *drillpipes* (DP), que são descidos dentro da coluna de revestimento, reduzindo significativamente o volume de deslocamento e, portanto, o tempo.

3.5.3 Cimentação primária multi-estágio

A cimentação pode também ser realizada em mais de um estágio, ou seja, quando o intervalo a cimentar é excessivamente longo, para diminuir os riscos de fratura da formação e de contaminação da pasta pelo fluido de perfuração.

3.5.4 Cimentação reversa

Nesse tipo de cimentação, a pasta de cimento é bombeada pelo espaço anular, ao invés do caminho contrário, como ocorre na cimentação usual. Sua grande vantagem é a baixa perda de carga (baixa dificuldade de fluxo), permitindo a cimentação de zonas com baixa pressão de fratura.

3.5.5 Cimentação em alta pressão e alta temperatura

Sob alta pressão e temperatura (acima de 104 °C), faz-se necessário a utilização de aditivos especiais na pasta de cimento, como a sílica, para reduzir a interferência desses fatores (pressão e temperatura) na resistência do cimento.

3.6 Ensaios laboratoriais

Antecedendo a operação de cimentação primária em um poço de petróleo, as pastas de cimento devem ser testadas, simulando-se seu comportamento nas condições de poço previstas para sua utilização, como:

- Pressão;
- Temperatura;
- Tempo previsto de operação;
- Regime de fluxo durante o deslocamento.

Entre os principais testes realizados em laboratório estão:

3.6.1 Resistência à compressão

É a medida da quantidade de tensão necessária para que o material atinja a ruptura. Visa determinar o desenvolvimento da resistência à compressão de uma pasta de cimento endurecida. Trata-se de uma propriedade que revela a capacidade do material manter sua integridade física, quando submetido a um carregamento mecânico. Materiais diferentes possuem mecanismos dissimilares de ruptura, fazendo-se necessário determinar as condições sob as quais se deseja avaliar a resistência de um dado material (HEWLETT, 2001).

Tal informação permite estimar a resistência que a pasta endurecida apresentará no poço.

3.6.2 Reologia

É a ciência que estuda a deformação ou escoamento da matéria quando submetida a esforços produzidos por forças externas. A relação entre tensão cisalhante e taxa de cisalhamento define o comportamento reológico dos líquidos. A reologia avalia as propriedades reológicas de uma pasta de cimento, em condições de superfície e de fundo de poço.

Os parâmetros reológicos de cada modelo (Bingham ou potência) são utilizados para a determinação do regime de escoamento e previsão das pressões geradas durante as operações de cimentação. Os valores de parâmetros reológicos médios obtidos em cenários similares não devem permitir a criação de fraturas, através de pressões excessivas para os equipamentos e materiais do poço.

O modelo cujo índice de correlação (R^2) mais se aproximar de 1,0 será o escolhido. Contudo, se a diferença entre os índices de correlação dos dois modelos for menor do que 0,05, adotar o modelo da lei de potência.

3.6.3 Densidade

É a propriedade física utilizada para identificar se os produtos que compõem a pasta de cimento encontram-se nas proporções estabelecidas em laboratório, através da medição da densidade final da pasta de cimento, após o seu preparo.

3.6.4 Água livre

Após o preparo e a homogeneização (em um consistômetro atmosférico por 20 minutos), a pasta de cimento é colocada em uma proveta graduada de 250 mL, por 2 horas, em repouso.

Este teste quantifica o percentual do volume de água na fase sobrenadante, sem característica cimentante. Essa informação permite estimar a suscetibilidade de uma pasta em ter seu volume total efetivo reduzido e, portanto, não cimentar (isolar) todo o trecho previsto. A norma ABNT NBR 9831 (2008) e CAMPOS e VELLASCO (2005) estabelecem o método para determinação de água livre das pastas de cimento.

3.6.5 Filtrado

Especifica a perda da fase líquida, em condição estática, a partir do volume de pasta de cimento contido num filtro-prensa API, ou seja, cujas especificações do equipamento estão de acordo com as estabelecidas pelo Instituto Americano de Petróleo (API), através de um elemento filtrante, submetido a um diferencial de pressão de 1000 psi (70,31 kgf/cm²) e sob a temperatura requerida para o teste, durante período de tempo máximo de trinta minutos.

3.6.6 Consistometria

Determina os tempos de bombeabilidade e pega da pasta de cimento, que variam de acordo com a temperatura e a pressão no fundo do poço que se pretende cimentar. A pasta tem que se manter fluida durante o tempo necessário à realização do bombeio e posicionamento desta no espaço anular do poço, entre o revestimento e a formação, adquirindo resistência mecânica rapidamente, após o término deste. Este tempo chama-se de tempo de bombeabilidade, que é conhecido como o tempo durante o qual a pasta ainda tem fluidez para ser bombeada para o poço. O tempo de bombeabilidade da pasta é atingido a 50 Uc. Acima deste valor, a pasta de cimento perde plasticidade rapidamente, dificultando progressivamente o bombeio da mesma. O tempo de espessamento ou tempo de pega da pasta é atingido quando a consistência alcança 100 Uc. Neste momento, a pasta encontra-se curada (endurecida). A unidade de consistência (Uc), também conhecida como unidade Bearden (Bc), é uma medida adimensional da bombeabilidade ou consistência da pasta de cimento. Não há conversão entre Uc e as unidades de viscosidades dinâmicas usuais como Pa.s ou cP.

3.7 Pasta de cimento

A pasta de cimento, além do próprio cimento, contém ainda água e aditivos químicos com finalidades diversas. Os principais componentes de uma pasta de cimento são:

3.7.1 Cimento Portland CPP – Classe Especial

Trata-se de um cimento classe A modificado industrialmente, com propriedades físico-químicas semelhantes às do cimento Portland Classe G. É utilizado quando propriedades

especiais (presentes no cimento Portland Classe G) não são requeridas, e em profundidades verticais de até 1828 m. Seu custo é inferior ao custo do cimento Portland Classe G. Atualmente, essa classe de cimento é aplicada nas operações de cimentação de poços terrestres. Sua massa específica é de 3165 kg/m^3 . Esta pesquisa foi elaborada utilizando cimento Portland, classe especial.

3.7.2 Aceleradores

Quando o cimento é misturado com água, o sulfato de cálcio e os quatro principais compostos do clínquer (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF) inicia-se um processo de dissolução na água ficando a fase líquida da pasta de cimento saturada com íons destes compostos. Os aceleradores aumentam a taxa de hidratação do cimento através do crescimento do caráter iônico da fase aquosa, levando os principais compostos do cimento a se hidratarem, liberando desta forma, o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , originando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é o agente promotor da pega do cimento. Visam diminuir o tempo de espessamento (antecipar a pega da pasta de cimento) e aumentar a resistência compressiva inicial da pasta. Os aceleradores mais comuns são:

- Cloreto de cálcio (CaCl_2), na proporção de 0,5 a 2% em peso do sal por peso de cimento. Responsável pela expansão do calor de hidratação, aumento da viscosidade, crescimento rápido da resistência compressiva, ampliação do encolhimento da pasta, incremento da permeabilidade final e com redução da resistência da pasta a sulfatos (CAMPOS e VELLASCO, 2005).
- Sal comum (NaCl), em baixas concentrações (até 6% em peso do sal por peso de água doce). Em concentrações maiores que 6% p/p, o sal atua como um retardador.

3.7.3 Retardadores

São muito úteis para grandes volumes de deslocamento, e visam postergar o início da pega da pasta, aumentando, portanto, o tempo de bombeabilidade. São constituídos por produtos à base de ácidos orgânicos, derivados de celulose, e derivados de glicose. Os retardadores mais utilizados nas pastas de cimento são lignosulfonatos.

3.7.4 Estendedores

São utilizados para reduzir a densidade da pasta através do aumento do rendimento, isto é, do volume, ou seja, reduzem a quantidade de cimento empregado na pasta, por unidade de volume. O rendimento de uma pasta de cimento é o volume de pasta produzido por cada pé cúbico de cimento, expresso em pés cúbicos de pasta por pé cúbico de cimento. O estendedor

mais comum é a argila pré-hidratada (por exemplo: bentonita). Em situações especiais, utiliza-se nitrogênio ou microesferas cerâmicas para criar pastas excepcionalmente leves.

3.7.5 Redutores de fricção (ou dispersantes)

São substâncias que atuam nas cargas elétricas superficiais das partículas das pastas de cimento, alterando assim as suas propriedades reológicas. Por reduzirem a viscosidade aparente das pastas, diminuem a perda de carga durante o fluxo, possibilitando assim o bombeio das pastas de cimento com maiores vazões. A depender da concentração na pasta de cimento, o dispersante pode provocar resultados inesperados como o aumento do teor de água livre, decantação de sólidos em suspensão e, como consequência direta desta última, alteração do tempo de espessamento da pasta. Os dispersantes comumente empregados são sais de polinaftaleno sulfonato de sódio (CAMPOS e VELLASCO, 2005).

3.7.6 Controladores de filtrado

Durante o contato da pasta de cimento, posicionada em frente às zonas permeáveis, ocorre uma filtração e a consequente formação de reboco. O reboco é formado pela deposição de sólidos aderidos nas paredes do poço, à medida que a fase contínua deste fluido (água de mistura⁷) penetra nos poros da formação. Essas substâncias controladoras aumentam a viscosidade do filtrado, buscando evitar a desidratação (perda de líquido) prematura da pasta, que poderia causar o aumento de pressão de bombeio durante o deslocamento da pasta. Os produtos mais utilizados são: polímeros sintéticos, látex e derivados de celulose.

3.8 Nova tecnologia com cimento geopolimérico para a cimentação de poços de petróleo

A utilização desses cimentos causa poluição ao meio ambiente, assim como, a redução de matéria-prima (calcário). A fabricação de cimento requer a queima de grandes quantidades de combustível e decomposição do calcário, resultando em emissões significativas de dióxido de carbono (SUPPIAH, 2016). Tais fatos impulsionam pesquisas com cimento geopolimérico para aplicação na indústria de petróleo.

A principal característica do cimento geopolimérico é sua capacidade de se adaptar a diversos cenários e manter suas propriedades físicas sob várias condições. A robustez e versatilidade deste cimento viabilizam a sua produção em proporções distintas de silicato de alumínio/cinza volante, proporcionando boas propriedades para sua aplicação, a um custo mínimo (MAHMOUDKHANI, 2008). A combustão do carvão mineral nas usinas

⁷ Água de mistura - é o fluido composto pela água (doce e/ou salgada) e aditivos sólidos e/ou líquidos nela dissolvidos.

termelétricas produz resíduos classificados como cinzas de fundo (pesadas), cinzas volantes (leves) e escórias. As cinzas volantes (leves) são resíduos resultantes da queima do carvão mineral, amplamente disponível em todo o planeta. O consumo destas cinzas na fabricação do cimento geopolimérico é proposto na gestão destes resíduos. No cimento geopolimérico à base de cinza volante, a sílica e a alumina presentes nos materiais de origem são induzidas por ativadores alcalinos para formar um gel conhecido como aluminossilicato (AL BAKRI, 2011). O papel do aglutinante no cimento geopolímero é a argamassa que também possui propriedades pozolânicas como no cimento Portland e é rica em alumina e silicato.

Os materiais utilizados para a preparação de cimento geopolimérico são: cinzas volantes Classe F (baixo teor de CaO), solução de hidróxido de sódio e solução de silicato de sódio. Diferentes proporções de cinzas volantes são misturadas em taxas distintas aos silicato e hidróxido de sódio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$), como por exemplo, 0,25; 0,5; 1,0; 2,5, para produzir diversas densidades de pastas geopoliméricas, adicionando dispersante para controlar as propriedades reológicas das mesmas.

A concentração de soda cáustica (NaOH) é avaliada, em diferentes proporções de silicato e hidróxido, na composição do cimento geopolimérico desenvolvido para poços de petróleo, assim como os seus efeitos na densidade, reologia e resistência compressiva. Pastilhas de soda cáustica são diluídas com água destilada, com molaridades de 8, 10, 12 e 14 mol.L^{-1} . A solução é misturada ao silicato de sódio para formar uma solução alcalina. As cinzas volantes são adicionadas ao reagente para formar uma mistura homogênea, a qual é testada quanto à sua densidade e propriedades reológicas, à temperatura ambiente. Esta mistura é colocada num molde de 50 mm, curada a 930 °C e 3000 psia, por 24 h. Os cubos são avaliados quanto à resistência compressiva.

Os resultados obtidos demonstram que:

- a) À medida que a concentração de hidróxido de sódio aumenta, a densidade do cimento geopolimérico aumenta. Não há variação significativa na densidade do cimento geopolimérico.
- b) Aumentando-se as proporções de silicato e hidróxido na pasta de cimento, aumenta-se a viscosidade da pasta de cimento.
- c) A resistência à compressão aumenta à medida que a molaridade da soda cáustica aumenta. Entretanto, quando alcança 14 mol.L^{-1} , é observado um efeito adverso ao desenvolvimento da resistência.
- d) A redução na porosidade do cimento geopolimérico pode ser obtida.

3.9 Redução do filtrado da pasta de cimento por nanopartículas de barita

A perda de fluido da pasta de cimento pode causar perda de qualidade da cimentação e sua funcionalidade. Uma pasta de cimento com problema no filtrado contém agentes adensantes em sua composição. Nesse estudo, foi investigado o efeito das nanopartículas de barita na perda de fluido de uma pasta de cimento, em diferentes concentrações. As nanopartículas de barita foram geradas através do método de moagem a seco, usando-se um moinho de bolas de alta energia. Estas foram adicionadas a pastas de cimento, em várias concentrações. Foram realizados testes para a determinação dos respectivos filtrados, em meio estático, utilizando um filtro prensa de baixa temperatura e baixa pressão.

As nanopartículas têm elevada área específica e alta taxa de atividade devido ao seu tamanho (YAZDI et al., 2011). A combinação do cimento Portland com aditivos nanoparticulados possibilita que as propriedades físicas desejadas para uma pasta do cimento sejam obtidas mais facilmente, tais como: resistência compressiva, resistência à abrasividade, tempo de espessamento e perda de filtrado. Estudos experimentais conduzidos por SHIYI et al., (2014) revelou que a adição de nano-caulinita à argamassa de cimento melhora a resistência ácida. Lu et al. (2015) estudaram o efeito de flexão do cimento modificado com nano-argila, nanossilicato e nano-titânio nas propriedades de ligação do cimento. Nazari e Riahi (NAZARI e RIAHI, 2010) investigaram o efeito do óxido nano-titânio sobre a permeabilidade da água e as propriedades térmicas e mecânicas do concreto auto-compactante de alta resistência. Eles mostraram que a resistência à compressão do cimento e a resistência à permeabilidade à água são melhoradas pela adição de nanopartículas de óxido de titânio à pasta de cimento. Os resultados obtidos na pesquisa realizada com as nanopartículas de barita foram:

- a) À medida que a concentração das nanopartículas de barita aumentava, de 0 a 5% em peso de pasta de cimento, a perda média de fluido diminuía pela metade. Os resultados demonstram que uma redução de 50% no filtrado pode ser atingida substituindo-se 3% em peso de barita normal por nanopartículas de barita, na pasta de cimento.
- b) As nanopartículas de barita podem ser utilizadas tanto para adensar a pasta como para reduzir a necessidade de controladores de filtrado.
- c) O tempo de espessamento de uma pasta de cimento é diminuído com a redução do fator água-cimento (FAC). Ou seja, a perda de fluido da pasta afeta significativamente o tempo de espessamento desta.

- d) A substituição da barita por nanopartículas de barita pode efetivamente reduzir a perda de fluido da pasta de cimento, mantendo as propriedades originais da pasta de cimento e desta forma, a qualidade do cimento ao longo do poço.
- e) A redução da perda de fluido utilizando as nanopartículas de barita é atribuída ao aumento da superfície específica dos sólidos em suspensão.
- f) As nanopartículas de barita não afetam o tempo de espessamento do cimento em comparação com a barita normal. Em geral, pode-se concluir que o tempo de espessamento diminui à medida que o teor de água é reduzido. O efeito da perda de fluido afeta tremendamente o tempo de espessamento do cimento.
- g) A redução da perda de fluido utilizando as nanopartículas de barita é atribuída ao efeito da fração, em volume, de sólidos diferentes. Estas nanopartículas obstruem os poros da pasta de cimento retida no filtro e, através disso, elas diminuem a perda de fluido do cimento.
- h) A perda de fluido da pasta de cimento para a formação pode não ser devidamente representada, especialmente em casos de campo com grande área de superfície (formação) exposta.

A inovação técnica deste estudo encontra-se na aplicação de nanopartículas de barita em baixas concentrações, para reduzir a perda de fluido da pasta de cimento, em até 50% em volume, para a formação (ATASHNEZHAD et al., 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos: a localização da área pesquisada, os materiais utilizados, os testes realizados em laboratório, equipamentos empregados com os respectivos procedimentos aplicados nos ensaios laboratoriais, e a metodologia adotada no beneficiamento do cascalho.

A etapa experimental inicial teve como suporte a infraestrutura física e de pessoal do LabCim, pertencente ao Núcleo Tecnológico em Cimentação de Poços de Petróleo (NTCPP), concebido através de parceria interna entre o Centro de Tecnologia e o Centro de Ciências Exatas e da Terra, ambos pertencentes à UFRN, e com parceria externa, entre a UFRN e o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), da Petrobras.

4.1 Localização da área pesquisada

A bacia Sergipe-Alagoas situa-se na margem continental do Nordeste meridional do Brasil. Abrange parte dos estados de Sergipe e Alagoas e possui área total em torno de 44,3 mil km², dos quais 31,7 mil km² encontram-se no mar, até a cota batimétrica de 3.000 m. Na porção terrestre, esta possui 12,6 mil km². Limita-se ao norte com a Bacia de Pernambuco-Paraíba e, ao sul, com a Bacia de Jacuípe.

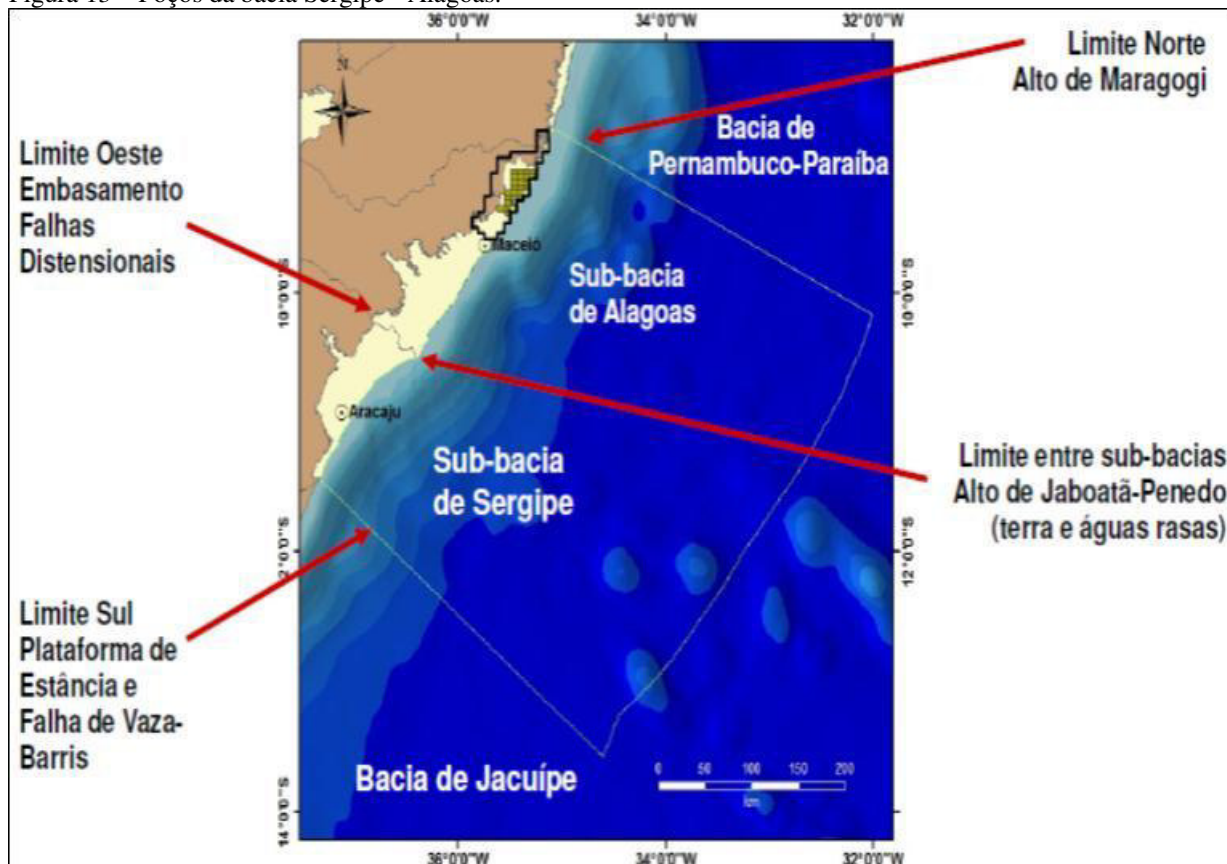
De acordo com o Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural, divulgado pela ANP em abril de 2017, a produção média de petróleo e gás foi de, aproximadamente, 36,5 mil boe (barril de óleo equivalente) por dia, oriundos, em média, de 28 campos em atividade neste período.

A bacia é subdividida em duas seções. A seção norte, designada de sub-bacia de Alagoas e a seção sul, denominada de sub-bacia de Sergipe, encontram-se separadas pelo alto de Japoatã, em Sergipe e pelo alto de Penedo, em Alagoas.

A seção norte está delimitada pelo alto de Maragogi, que separa a bacia Sergipe-Alagoas da bacia Pernambuco-Paraíba.

Na seção sul, a bacia Sergipe-Alagoas está delimitada pela plataforma de Estância, que a separa da bacia de Jacuípe. A área de estudo (Figura 13) está restrita à porção sergipana da bacia (CRUZ, 2008).

Figura 13 – Poços da bacia Sergipe - Alagoas.



Fonte: ANP, 2012.

Seguem os dados geológicos mais relevantes da Bacia Sergipe-Alagoas:

- Origem: Rifteamento Juro-Cretáceo das placas sulamericana e africana;
- Estilos tectônicos: tectônica diastrófica, que afeta as sequências pré-rifte e rifte, e adiastrófica (halocinética), nas demais sequências;
- Arcabouço estrutural: rifte assimétrico, alongado, com extensão de 350 km na direção NE-SW, dividido em duas sub-bacias (Sergipe e Alagoas);
- Principais estruturas: falhas na direção N45°E (Charneira Alagoas) com rejeitos verticais de até 5 km; horstes⁸ alongados, limitados por falhas normais (Alto de Penedo), anticlinais, estruturas de escorregamento e falhas lítricas relacionadas à tectônica salífera.

⁸ Horst é a designação dada em geologia estrutural e em geografia física a um bloco de território elevado em relação ao território vizinho por ação de movimentos tectônicos.

4.2 Materiais utilizados na pesquisa

As amostras de cascalhos analisadas no presente estudo foram fornecidas pelo Centro de Tratamento de Cascalhos (CTC), da Petrobras/UO-SEAL, localizado no município de Carmópolis – SE, com, aproximadamente, 100 kg de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base sintética. Os materiais empregados no presente estudo foram:

- Cascalhos úmido e seco;
- Cimento Portland classe especial para poços de petróleo;
- Controladores de filtrado;
- Aceleradores;
- Estendedores;
- Retardadores;
- Dispersantes;
- Água industrial utilizada nas cimentações dos poços de Carmópolis.

4.3 Testes realizados em laboratório

Os testes realizados em laboratório visaram determinar as propriedades físicas e químicas de uma pasta de cimento destinada à operação de cimentação em poços petrolíferos. As pastas avaliadas foram submetidas às pressões e temperaturas, de superfície e de fundo do poço ($P_{\text{fundo}} = 1450 \text{ psi}$ e $T_{\text{fundo}} = 146 \text{ }^{\circ}\text{F}$), em condições dinâmicas e estáticas. Os parâmetros reológicos são concomitantemente estabelecidos. Tais parâmetros são utilizados para a determinar, conforme a geometria do poço, o regime de escoamento e previsão das pressões geradas durante as operações de cimentação.

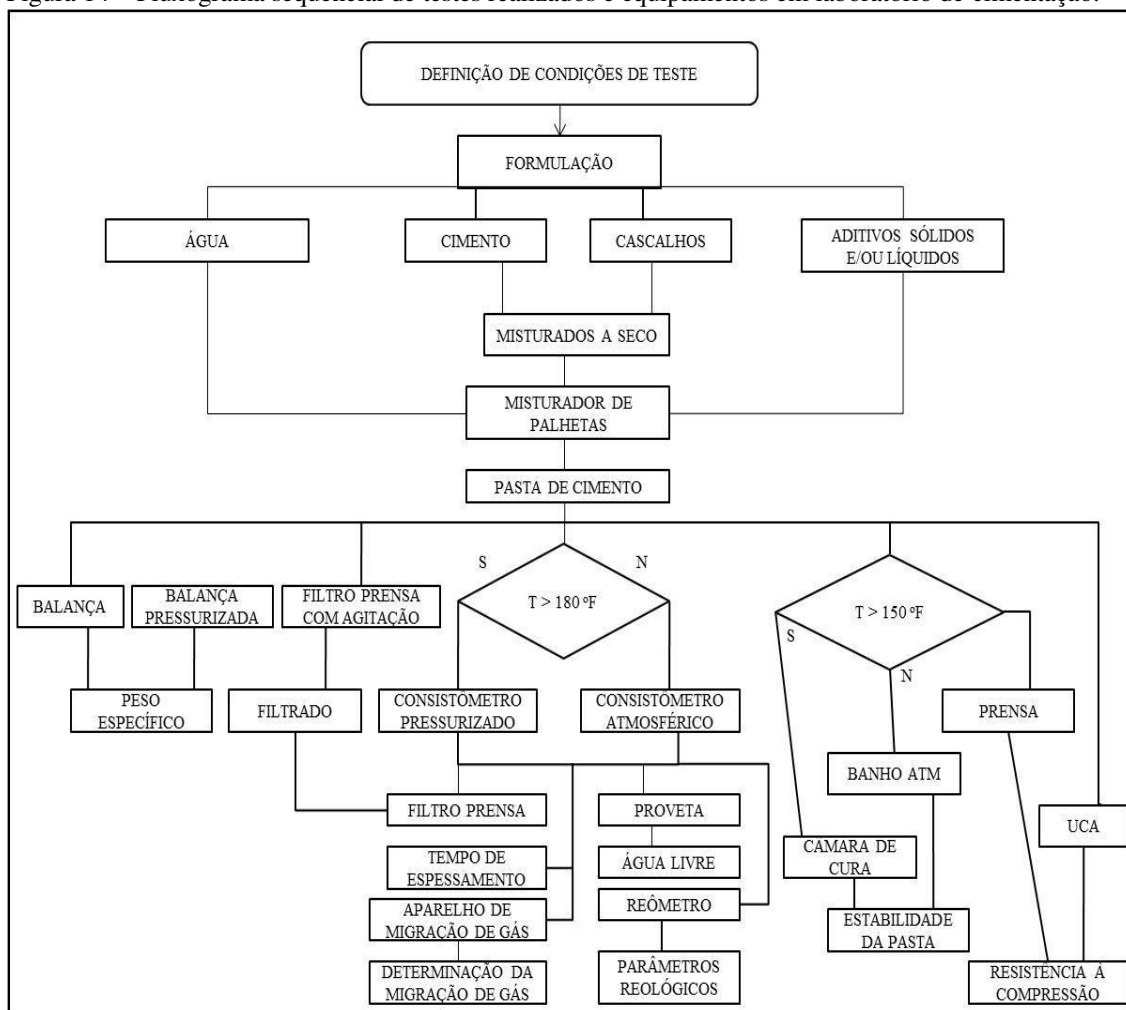
4.3.1 Fluxograma de testes e equipamentos do laboratório de cimentação.

No fluxograma da Figura 14 é possível observar a sequência dos testes com pastas de cimento, realizados e requeridos pelos laboratórios de cimentação das operadoras e companhias de serviços.

Esta mesma sequência de testes foi adotada para este estudo, utilizando produtos químicos convencionais que caracterizam uma pasta de cimento de produção, e com a adição de cascalho em sua composição, visando determinar o percentual máximo de cascalho que esta pasta poderia conter, desde que mantivesse as propriedades físicas requeridas pela indústria.

Estas propriedades físicas requeridas, para o cenário de poço ora avaliado, encontram-se elencadas no item 5.5.

Figura 14 – Fluxograma sequencial de testes realizados e equipamentos em laboratório de cimentação.



Fonte: AUTOR, 2017.

A homogeneização e preparo da pasta de cimento para a realização dos testes laboratoriais estão descritos no item 4.4.1.

4.4 Equipamentos empregados

Os instrumentos, aparelhagem e equipamentos, manuseados no laboratório de cimentação da UFRN (LabCim), que atendem às especificações estabelecidas pela indústria de petróleo, para a realização de testes de pastas de cimento, são descritos a seguir.

4.4.1 Homogeneizador e parâmetro API

O condicionamento da pasta é realizado antes da execução dos testes laboratoriais que determinam suas propriedades físicas, tais como: resistência à compressão, tempo de espessamento, reologia, filtrado, água livre e estabilidade.

- Misturador de palheta com controlador de velocidade (Waring Blender):

Efetua-se um balanço de massa para a determinação da quantidade de cada produto que compõe a pasta de cimento, estabelecendo o volume final de pasta de 600 mL, por ensaio, descrito no item 5.7.1.

Emprega-se um misturador de palheta com controlador de velocidade. Opera-se em baixa rotação, para efetiva mistura dos componentes da pasta de cimento, conforme especificado no item 4.4.3 da NBR 9826/93.

As propriedades físicas da pasta de cimento são influenciadas pela energia consumida na mistura da pasta.

O critério API minimiza as diferenças das misturas realizadas no laboratório e no campo.

▪ Energia de mistura

A energia de mistura que deve ser aplicada à pasta de cimento é de $E = 5,9 \text{ kJ/kg}$. Utilizando-se a Equação 01, calcula-se a energia específica de mistura (kJ/kg) e, em seguida, com esta mesma equação, definem-se os períodos de tempo de adição do cimento à água de mistura e o período de homogeneização;

$$E_{\text{Lab}} = 6,6894 \cdot 10^{-8} [\Sigma (N^2 \cdot t)] \quad (01)$$

Onde:

- E_{Lab} : Energia de mistura fornecida à pasta, em kJ/kg;
- N: rotação em rpm;
- t: tempo em min.

4.4.2 Condicionamento da pasta de cimento

O condicionamento da pasta é efetuado para a homogeneização de pastas cimentantes com aquecimento, para os testes de reologia, perda de fluido e água livre aquecida.

Equipamento utilizado: Consistômetro atmosférico (Figura 15);

É um recipiente de aço inoxidável para banho de água, o qual armazena duas células cilíndricas, que devem girar a $150 \pm 15 \text{ rpm}$. Cada célula apresenta internamente uma palheta estacionária imersa na pasta de cimento. Esta palheta transmite o torque imposto pela pasta a uma mola acoplada a um dial, que indica a consistência da pasta. O equipamento é dotado de um dispositivo aquecedor que possibilita elevar e controlar a temperatura do banho, a partir da temperatura ambiente, até $180 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ($82 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Características adicionais do equipamento são elencadas a seguir:

- Rotação: 150 rpm;
- Célula cilíndrica rotativa com palheta interna estacionária que recebe o torque da pasta e transmite a uma mola;
- Permite aquecimento até 82 °C (~ 180 °F) e resfriamento até 4,44 °C (40 °F).
- Características construtivas semelhantes ao consistômetro pressurizado;
- Utilizado com adaptação para ensaios resfriados;
- Usado na homogeneização de pastas com aquecimento para os testes de reologia, perda de fluido e água livre.

Figura 15 – Consistômetro atmosférico.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

4.4.3 Massa específica da pasta de cimento

É determinado na balança de lama. A massa específica real, ou apenas, massa específica, é o peso de uma pasta de cimento por unidade de volume, cuja quantidade de ar aprisionada é desprezível. A massa específica real é determinada em balança do tipo pressurizada. A massa específica aparente é a massa de uma pasta de cimento por unidade de volume, podendo conter uma quantidade de ar aprisionada na mesma. Ambos os pesos específicos (real e aparente) das pastas de cimento são determinados. As Figuras 16 e 17 apresentam uma balança convencional e uma balança pressurizada, respectivamente.

Figura 16 – Massa específica (aparente) da pasta obtido através da balança convencional.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

Figura 17 – Massa específica (real) da pasta obtido através da balança pressurizada.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

4.4.4 Tempo de espessamento

O teste de consistometria ou de espessamento tem a função de determinar o tempo em que uma pasta permanece bombeável, sob as condições simuladas de pressão e temperatura de fundo do poço.

Trata-se do intervalo de tempo necessário para que a pasta de cimento atinja 100 Uc nas condições de teste. Ou seja, refere-se ao tempo decorrido entre o preparo da pasta de cimento e o endurecimento (cura ou pega) da mesma. A unidade Bearden (Uc), ou unidade de consistência, é número adimensional, relacionado à viscosidade, que representa a resistência oferecida pela pasta de cimento ao movimento das palhetas dos consistômetros atmosférico e

pressurizado, medido pelo grau de deflexão da mola do potenciômetro desse aparelho, através de torques equivalentes.

O tempo que a pasta permanece fluida (bombeável) em condições simuladas de poço (pressão e temperatura), designa-se de tempo de bombeabilidade, estabelecido como o tempo para atingir 50 Uc (de acordo com a Petrobras) ou 70 Uc (conforme as demais operadoras). A temperatura é um fator crítico. As temperaturas avaliadas nos testes são:

- BHCT – Temperatura de circulação no fundo do poço (Bottom Hole Circulating Temperature);
- BHST – Temperatura estática no fundo do poço (Bottom Hole Static Temperature).

4.4.5 Consistômetro pressurizado

Equipamento constituído por uma câmara de pressurização, células de teste, palheta estacionária, potenciômetro, bomba de pressurização, sistema de aquecimento, termopares, indicadores de temperatura, manômetros, cronômetro, sistema de registro gráfico e dispositivo calibrador do mecanismo do potenciômetro.

A célula cilíndrica contendo a pasta de cimento se acopla externamente a um motor que gira na rotação de 150 ± 15 rpm. Internamente à célula, a palheta estacionária imersa na pasta de cimento transmite o torque imposto pela pasta a uma mola acoplada a um potenciômetro que registra continuamente a voltagem. As principais características do consistômetro pressurizado são:

- Copo rotativo (150 rpm);
- Consistômetro típico (Figura 18);
 - $T_{\text{máx}} = 204,45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($400 \text{ }^{\circ}\text{F}$);
 - $P_{\text{máx}} = 1.757,67 \text{ kgf/cm}^2$ ($25.000 \text{ lb}_f/\text{pol}^2$)
- Palheta estacionária: mede torque (consistência) exercido pela pasta sobre a palheta enquanto a célula gira (Figura 19).
- Permite as programações depressão e temperatura sob as quais a pasta de cimento é submetida até o seu posicionamento final no poço.

Figura 18 – Consistômetro pressurizado com mecanismo de calibração.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

Figura 19 – Célula do consistômetro pressurizado.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

4.4.6 Filtro prensa – perda de fluido estático – BTAP (baixa temperatura/alta pressão)

Trata-se de um cilindro onde a pasta de cimento é submetida a um diferencial de pressão de $70,31 \text{ kgf/cm}^2$ (1.000 lbf/pol^2) contra uma peneira de $0,044 \text{ mm}$ (ou 325 mesh⁹), suportada por uma peneira de $0,25 \text{ mm}$ (ou 60 mesh), durante 30 min, com o objetivo de determinar o volume filtrado que a pasta perde, em condições estáticas, para formação. As características adicionais do equipamento são:

- Perda de fluido em 30 minutos;
- $T_{\text{máx}} = 82 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\sim 180 \text{ }^{\circ}\text{F}$);
- Tipos de filtros-prensa:
 - BTAP - Baixa temperatura e alta pressão (até $93,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$);
 - ATAP - Alta temperatura e alta pressão (até $176,67 \text{ }^{\circ}\text{C}$);
 - Perda de fluido com agitação (Stirring);
- O filtrado é definido como a perda de fluido ocorrida durante 30 minutos;
- Homogeneização da pasta de cimento é efetuada no consistômetro atmosférico;
- O filtro prensa e a respectiva célula de filtrado API são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Filtro prensa e célula de filtrado API (em detalhe, no canto superior direito).



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

⁹Mesh ou malha – é o número de malhas (aberturas) por polegada linear (2,54 cm), segundo a norma ASTM E11-39

4.4.7 Resistência à compressão

O desenvolvimento da resistência à compressão de uma pasta de cimento é determinado pelo método ultrassônico. A medida da resistência é correlacionada através de um algoritmo interno, com o período de tempo que a onda ultrassônica leva para atravessar uma amostra sob cura (tempo de trânsito). O método, além de ser não destrutivo, permite um acompanhamento contínuo do desenvolvimento da resistência à compressão. As características do equipamento em que os testes foram realizados são:

- Mede o tempo de trânsito (emissor - receptor) de uma onda ultrassônica (frequência muito alta - VHF) através da pasta em condições simuladas de temperatura e pressão;
- Resistência ao longo do tempo - não é um ensaio pontual;
- Curvas de calibração do aparelho (Figura 21), a depender do peso da pasta presente na célula (Figura 22).

Figura 21 – Analisador ultrassônico de cimento.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

Figura 22 – Célula do analisador ultrassônico de cimento (UCA).



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

4.4.8 Teor de água livre

Busca-se determinar o percentual de volume da fase sobrenadante (teor de água acumulada), sem característica cimentante, obtido em 250 mL de pasta de cimento, após repouso de duas horas, à temperatura ambiente, em geral, numa proveta vertical de 250 mL, em condições estáticas (Figuras 23 e 24). Tal informação possibilita estimar a suscetibilidade de uma pasta em ter seu volume total efetivo reduzido, nas condições de poço. Caso isto ocorra, seguramente a cimentação primária não cobrirá toda a extensão do poço projetada.

O percentual é definido desde a temperatura ambiente até uma temperatura máxima de 82°C (~ 180°F - banho térmico – completa submersão da proveta).

Figura 23 – Proveta de 250 mL para medição do teor de água livre.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

A Equação 02 determina o teor de água livre (T_{AL}) de uma pasta de cimento.

$$T_{AL} (\%) = \frac{V_{AL} \text{ (mL)}}{V_{Pasta} \text{ (mL)}} \times 100 \quad (02)$$

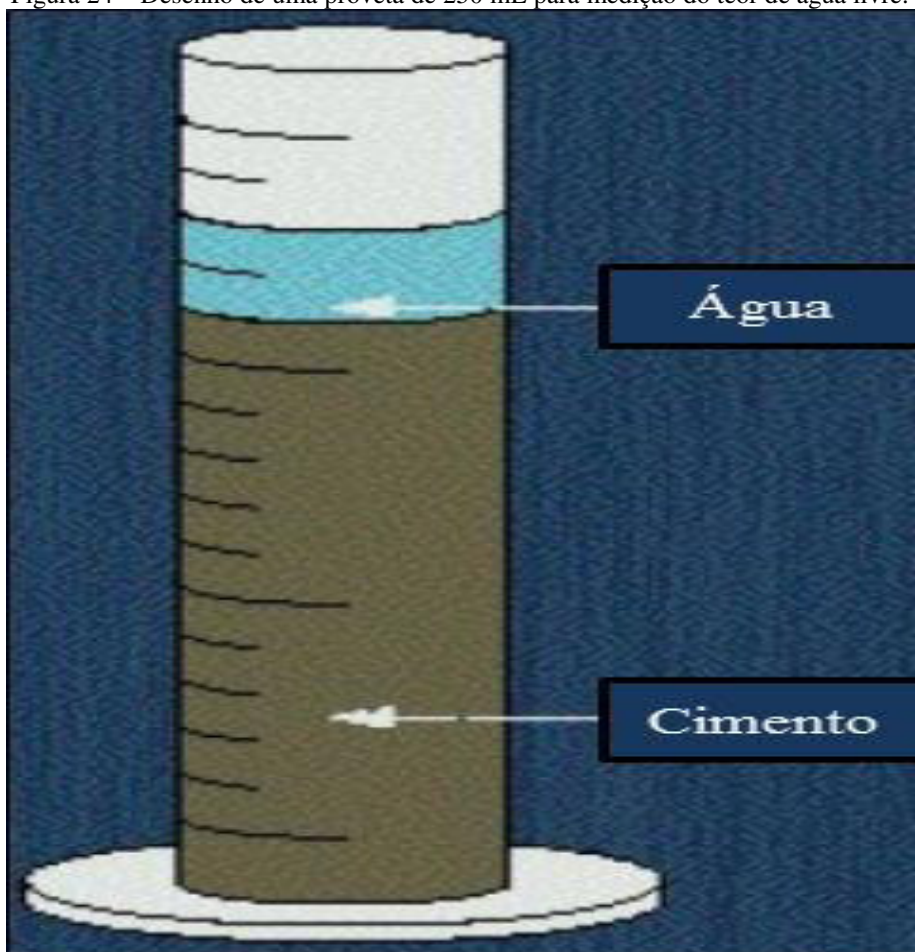
Onde:

T_{AL} = Teor de água livre, em percentual.

V_{AL} = Volume de água livre, em mL.

V_{Pasta} = Volume de pasta, em mL.

Figura 24 – Desenho de uma proveta de 250 mL para medição do teor de água livre.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

4.4.9 Estabilidade da pasta de cimento (sedimentação)

Tem como objetivo analisar a segregação de sólidos na pasta de cimento quando submetida às condições encontradas nas cimentações de poços de petróleo. O procedimento adotado para a determinação da estabilidade da pasta de cimento está de acordo com CAMPOS e VELLASCO (2005). As características dos equipamentos utilizados são:

- Teste do tubo decantador (Figura 25);
- Tubo de 203,2 mm (8 pol) de comprimento por 25,4 mm (1 pol) de diâmetro;
- Após a pega da pasta, são medidos:
 - Rebaixamento do topo ($\leq 5,0$ mm);
 - Diferença do peso entre o topo e à base da amostra ($< 0,5$ lbm/gal).

Se a maior diferença de massa específica entre as 4 seções de corte do cilindro for $\geq 0,5$ lbm/gal e/ou o rebaixamento do topo da pasta for $> 5,0$ mm, a pasta é dita inconsistente e deve ser reformulada.

Figura 25 – Cilindro de cobre bipartido para a determinação da estabilidade da pasta.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

4.4.10 Reologia

Define as propriedades e parâmetros reológicos de uma pasta de cimento utilizando um reômetro rotativo (Figuras 26 e 27), de acordo com o modelo adotado:

- Modelo de Bingham: viscosidade plástica (VP) e limite de escoamento (LE);
- Modelo de Potência: índice de comportamento de fluxo (n) e índice de consistência (K). Determinar o gel inicial (G_i) e o gel final (G_f).

Os parâmetros acima mencionados são utilizados para a determinação do regime de escoamento e estimativa das pressões geradas durante as operações de cimentação.

O gel inicial (G_i) é um indicador da dificuldade que um fluido apresenta para reiniciar o movimento após parada de dez segundos. O gel final (G_f) é um indicador da dificuldade que um fluido apresenta para reiniciar o movimento após parada de dez minutos.

Figura 26 – Reômetro rotativo com combinação bob rotor R1-B1.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

Figura 27 – Reômetro rotativo com calibradores para as molas.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

4.5 Metodologia

As amostras de cascalhos, gerados a partir das operações de perfuração de poços de petróleo realizadas nos campos com maior atividade de perfuração *onshore* no estado de Sergipe (campos terrestres de Siririzinho, Carmópolis e Riachuelo), foram fornecidas por uma empresa contratada, provedora de equipamentos e pessoal qualificado, necessários ao processamento (segregação e secagem) dos cascalhos, através de contrato temporário com a operadora dos campos terrestres de petróleo acima mencionados. A estrutura ora relatada era denominada de Centro de Tratamento de Cascalhos (CTC), localizada em Carmópolis/SE. Atualmente, este centro de tratamento encontra-se desativado pela PETROBRAS/UO-SEAL.

4.5.1 Amostragem do cascalho de perfuração

O centro de tratamento de cascalhos (CTC) era dotado de equipamentos fornecidos e operados por empresa contratada pela operadora, através de contrato de prestação de serviço.

Estes equipamentos eram utilizados para efetuar o processamento dos cascalhos e recuperar o fluido de perfuração (base água ou sintético) impregnado nos mesmos. Os cascalhos úmidos eram recebidos pelo CTC, em caixas de contenção.

O CTC possuía autorização dos órgãos públicos fiscalizadores para exercer tal atividade.

No CTC, realizava-se a triagem de cascalho em função do tipo de fluido utilizado na perfuração dos poços, seja um fluido de base água ou um fluido de base sintética, visto que eram os únicos tipos de fluidos utilizados nas operações de perfuração de poços de petróleo na região. Duas amostras representativas (aproximadamente 100 kg) do campo foram fornecidas pelo CTC, considerando os cascalhos de calcilutitos fraturados misturados com folhelhos cinza-escuros, originários da Formação Muribeca/Membro Oiteirinhos.

4.5.2 Tratamento do cascalho

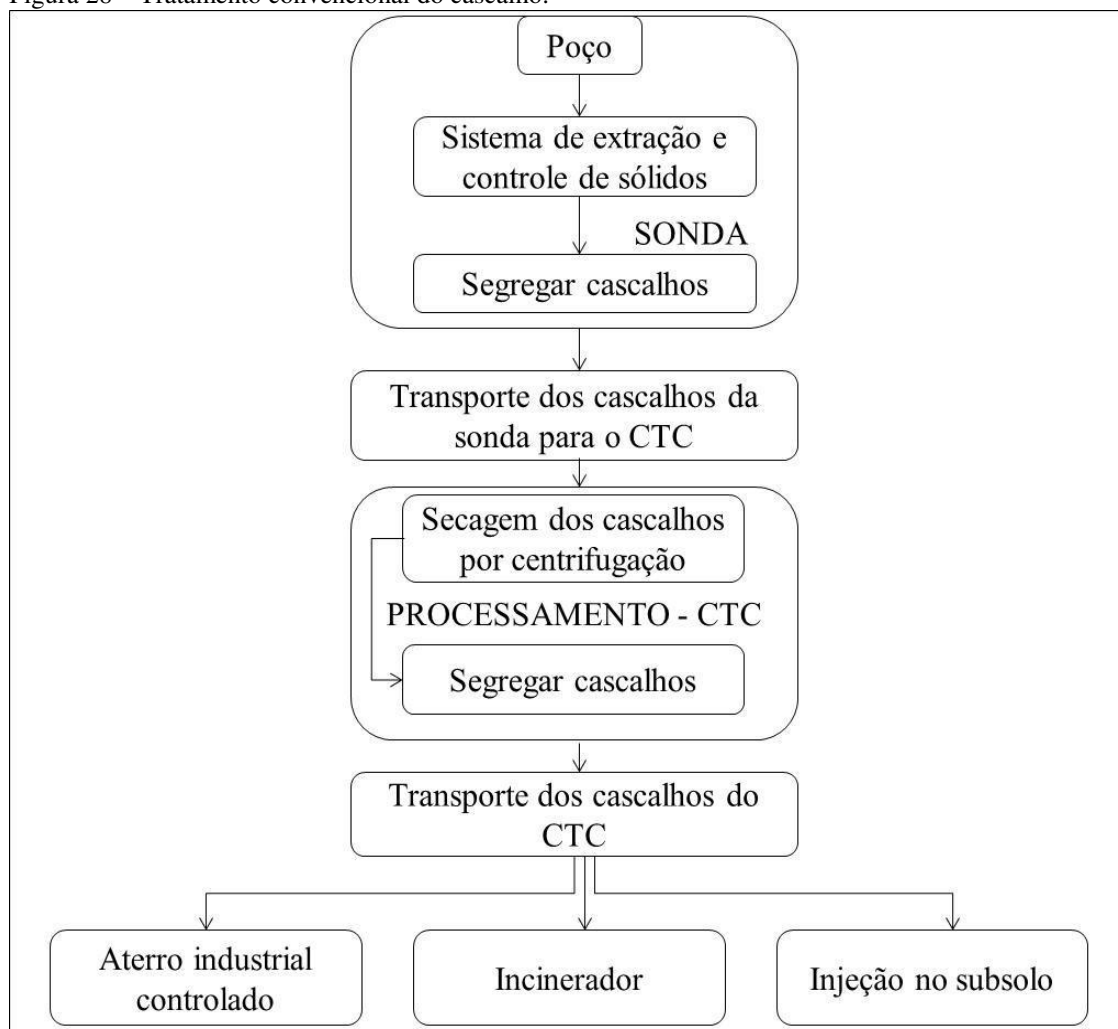
O procedimento adotado para o tratamento convencional do cascalho compreende as seguintes etapas demonstradas a seguir. São elas:

- Sistema de extração e controle de sólidos;
- Segregar cascalhos do fluido de perfuração;
- Transportar da sonda de perfuração terrestre para um CTC;
- Secagem dos cascalhos por centrifugação;

- Separação dos cascalhos por tipo de fluido de perfuração (base água, catiônico ou sintético) que os carregou até a superfície. O fluido de perfuração recuperado é enviado para uma estação de fluidos;
- Transportar os cascalhos para diques de armazenamento provisórios ou aterros industriais controlados ou para incineração, ou ainda, injetá-los no subsolo através de bombeamento.

O procedimento adotado em Sergipe até 2015, pela principal operadora no país, para o tratamento convencional do cascalho procedente da perfuração de poços terrestres de petróleo, é apresentado no fluxograma da Figura 28.

Figura 28 – Tratamento convencional do cascalho.



Fonte: AUTOR, 2017.

❖ Processamento do cascalho.

Nas sondas de perfuração, as peneiras vibratórias descartam cascalhos cujos pesos destes podem representar até 20% de óleo. Os cascalhos são conduzidos ao CTC e direcionados a um conjunto de equipamentos responsáveis pelo processamento deste.

Um destes equipamentos é o secador de vórtice. Este secador rotativo de cascalhos, por exemplo, é uma centrífuga vertical filtrante. Trata-se, até o momento, do único equipamento no mercado capaz de reduzir o teor orgânico aderido ao cascalho e, ao mesmo tempo, permitir a reutilização do fluido de perfuração (PEREIRA, 2010). Este secador de vórtice melhora a relação custo-benefício, reduzindo a quantidade de resíduos em suspensão no fluido de perfuração e, conseqüentemente, aumentando a eficiência na recuperação do fluido de perfuração. O secador é composto por um cesto cônico de tela de aço inoxidável que, ao receber os sólidos “molhados”, constituídos por fragmentos de rochas cortadas pela broca (cascalhos), petróleo, e fluido de perfuração, acelera-os aplicando força centrífuga de até 540 G. Devido à alta força G criada pelo grande diâmetro do cone que gira com elevada rotação, a separação sólido-líquido ocorre instantaneamente, conforme o fluido de perfuração entra contato com a superfície da tela, produzindo um descarte de sólidos secos.

Na fase de secagem, busca-se secar os cascalhos úmidos e reduzir o teor de óleo presente nestes a menos de 2%, por centrifugação. Esta iniciativa busca uniformizar o cascalho quanto:

- ✓ Ao fluido de perfuração que o carrega do fundo do poço até a superfície;
- ✓ À salinidade;
- ✓ À proporção líquido/sólido;
- ✓ Ao tamanho da partícula, a fim de padronizar a granulometria média do cascalho remanescente no fluido de perfuração recuperado.

Outra função deste secador é, através da força centrífuga empregada, recuperar fluido de perfuração não aquoso (óleo e/ou sintéticos), existente nos cascalhos.

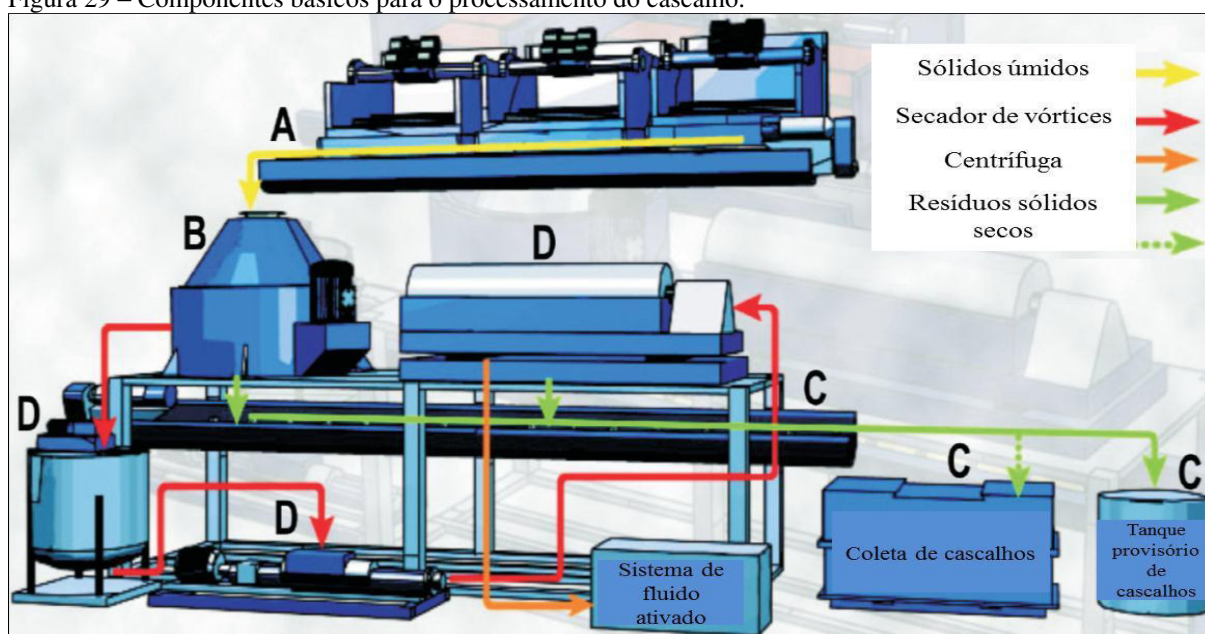
No CTC, os cascalhos são armazenados em caçambas posicionadas nas proximidades dos equipamentos que realizam o processamento dos cascalhos. O tamanho, a forma, o volume e a quantidade de umidade dos sólidos perfurados podem variar enormemente. A instalação de um sistema de entrega adequado é essencial para lidar com uma gama de materiais.

O processamento tradicional consiste de um sistema devidamente projetado e operado, composto pelas fases de secagem e segregação. Na fase de segregação, procura-se separar os

cascalhos impregnados pelo fluido de perfuração, do próprio fluido de perfuração. O fluido de perfuração deve ser recuperado. Os principais equipamentos (Figura 29) que compõem o processamento convencional são:

- Sistema de transporte (parafusos transportadores helicoidais ou esteiras transportadoras) para mover o cascalho até um secador rotativo (A);
- Secador rotativo (B);
- Sistema de coleta e descarga (C) de sólidos “secos”;
- Centrífuga (D) para limpar o efluente originário do secador rotativo.

Figura 29 – Componentes básicos para o processamento do cascalho.



Fonte: AUTOR, 2017.

No CTC, o processamento dos cascalhos ocorre da seguinte forma:

- ✓ Os sólidos secos (cascalhos) que se deseja tratar são lançados pelo parafuso transportador (A) helicoidal (ou esteira transportadora) na porção superior do secador de vórtice (B), que caem em um compartimento deste secador, composto de um tronco cônico rotativo dotado de raspadores.
- ✓ Os sólidos secos adquirem um movimento rotativo – de 800 a 1200 rpm – e são arremessados contra uma tela de 10 a 30 mesh (Figura 30), também em movimento rotativo. Esta última, por sua vez, impede a passagem dos sólidos mais grosseiros.
- ✓ Todo esse fluido é forçado a atravessar as aberturas do cesto de tela (Figura 31), enquanto os sólidos “secos” são extraídos pelas passagens angulares ligadas ao cone, que giram de forma levemente mais lenta do que o cesto.

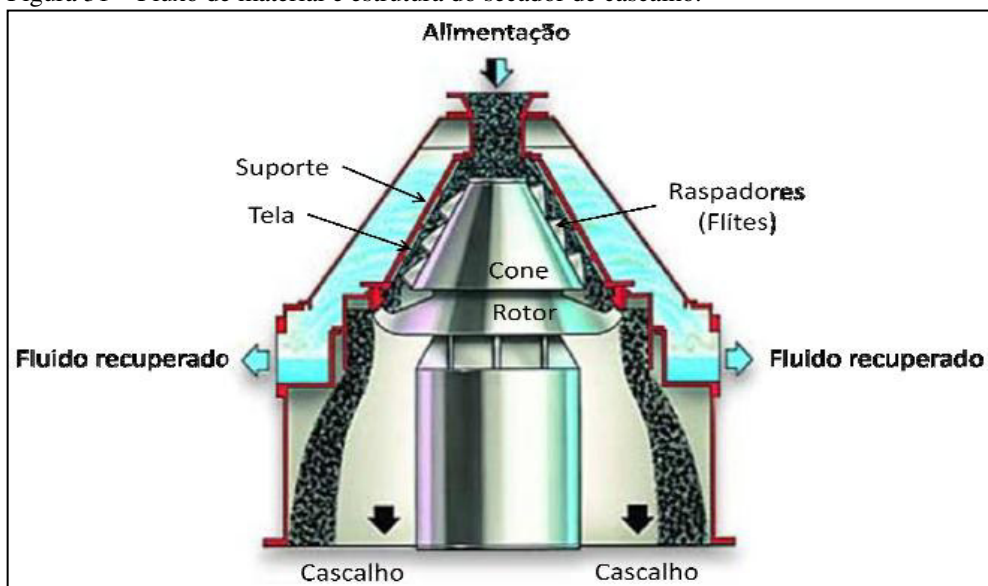
- ✓ O efluente do secador de vórtices é direcionado a uma centrífuga de decantação de alto volume (D) para posterior limpeza. A centrífuga de decantação separa o fluido de perfuração em sólidos finos e fluido de perfuração recuperado (limpo); Este fluido é, na maioria das vezes, enviado de volta para o sistema de fluido de perfuração em atividade. Uma parte deste fluido pode ser usada para a diluição no secador.
- ✓ Os sólidos provenientes da centrífuga são recolhidos em tanques para a coleta de cascalhos processados (C) e, posteriormente, enviados para o destino final dos mesmos (aterros controlados, injeção no subsolo, entre outros).

Figura 30 – Secador rotativo para efluentes.



Fonte: PEREIRA, 2010.

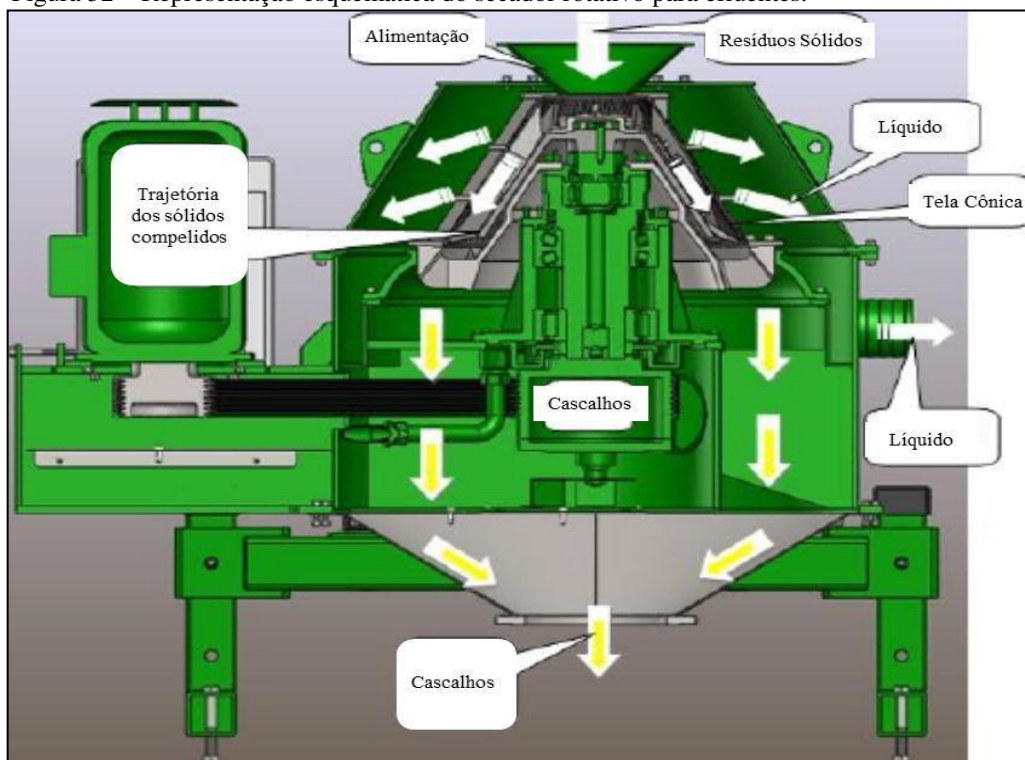
Figura 31 – Fluxo de material e estrutura do secador de cascalho.



Fonte: PEREIRA, 2010

Há secadores rotativos (Figura 32) com capacidade de processar os cascalhos gerados na perfuração de até 58 t/h, com velocidade máxima de processamento de até 46 m/h, em poço perfurado com diâmetro de 20 pol (508 mm).

Figura 32 – Representação esquemática do secador rotativo para efluentes.



Fonte: PEREIRA, 2010.

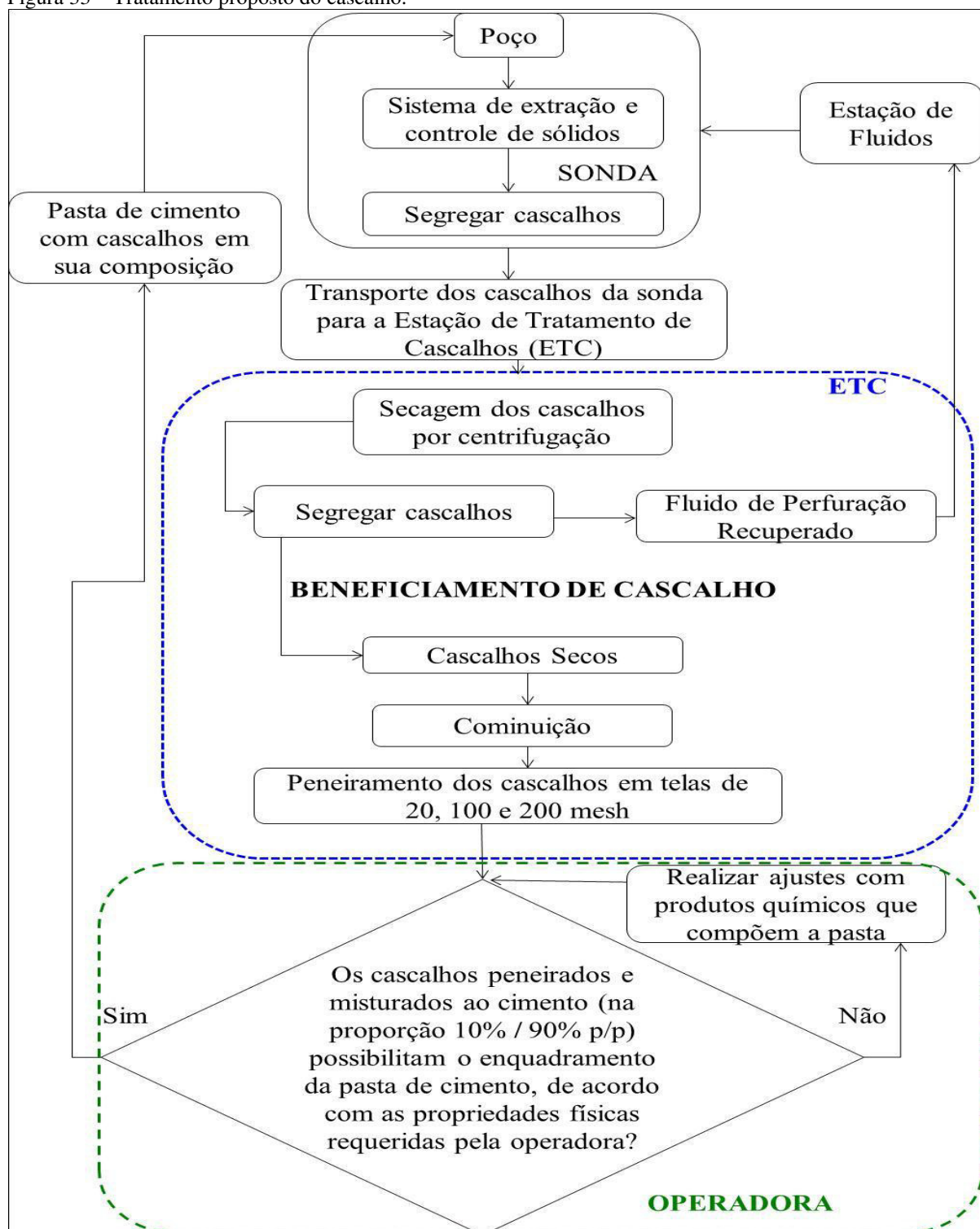
Basicamente, a separação é realizada por meio de centrifugação onde, ao final do processo, o volume de fluido recuperado, é enviado para a estação de fluidos.

A introdução do secador de cascalho visa atender aos parâmetros ambientais regulamentares de descarte de resíduos, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010). A legislação tem sido a força motriz para a utilização deste equipamento, juntamente com o uso de fluidos de perfuração sintéticos.

❖ Beneficiamento do cascalho

O tratamento proposto para o cascalho consiste em adicionar duas fases ao processamento, anteriormente executado pelo CTC, passando assim a ser denominado neste estudo de beneficiamento do cascalho (Figura 33), e a ser efetuado em um local com a infraestrutura necessária à execução deste último, aqui designado de Estação de Tratamento de Cascalhos (ETC).

Figura 33 – Tratamento proposto do cascalho.



Fonte: AUTOR, 2017.

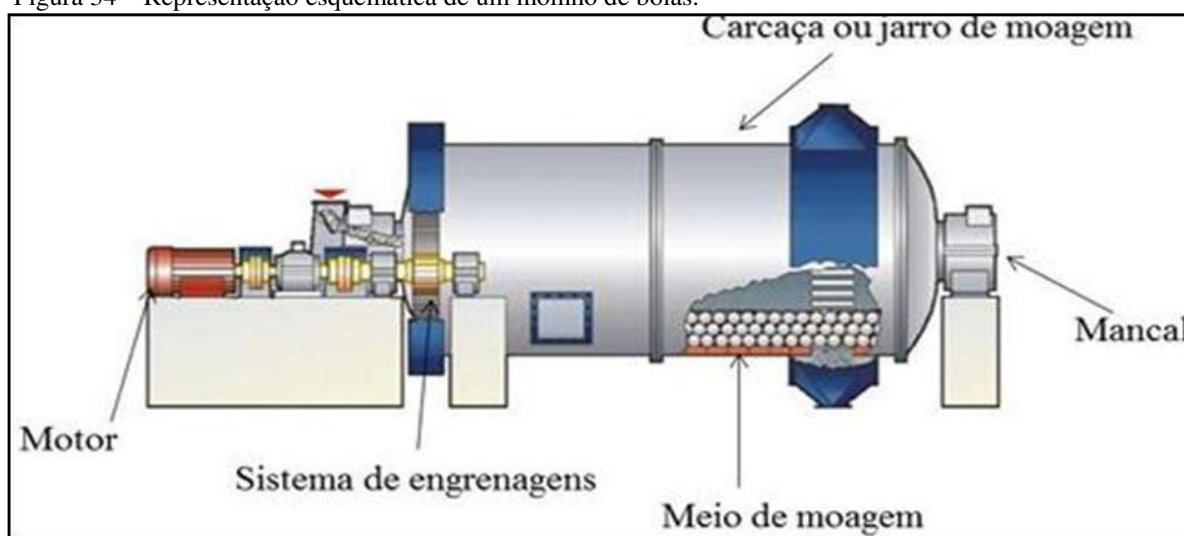
A viabilidade técnica de aplicação do cascalho na composição de pastas de cimento utilizadas pelas operadoras, a ser demonstrada nos resultados laboratoriais apresentados no capítulo 05, possibilita a implantação do processamento mais amplo do cascalho, já mencionado, e aqui denominado de beneficiamento do cascalho.

Para a adequação do cascalho às condições de mistura com o cimento seco (pó), as fases adicionais, além das fases de secagem e segregação já descritas são: cominuição e peneiramento do cascalho.

A fase de cominuição tem como objetivo fragmentar (triturar) os cascalhos, reduzindo de tamanho destes fragmentos de rocha.

O equipamento utilizado é o moinho de bolas (Figuras 34 e 35), composto por uma carcaça cilíndrica de ferro que gira sobre mancais. O moinho é revestido internamente com placas e contém em seu interior, uma carga solta de bolas de ferro ou de aço.

Figura 34 – Representação esquemática de um moinho de bolas.



Fonte: METSO, 2005.

Figura 35 – Moinho de bolas.



Fonte: JINPENG MINING MACHINERY, 2017.

Após a trituração, esses resíduos são transportados para uma peneira vibratória (Figura 36) com peneiras de números 20, 100 e 200 na escala mesh (correspondentes, respectivamente

às peneiras API 20, API 100 e API 200, cujas respectivas aberturas das malhas são: 0,841 mm, 0,149 mm e 0,074 mm).

A fase de peneiramento tem como propósito normalizar a granulometria média dos cascalhos (fragmentos de rocha), propiciando assim a aplicação dos cascalhos na composição da pasta de cimento, de acordo com as características físico-químicas postuladas pelas operadoras. Os cascalhos beneficiados, com uma faixa granulométrica de 20 a 200 mesh, são misturados ao cimento seco, conforme procedimento relatado a seguir.

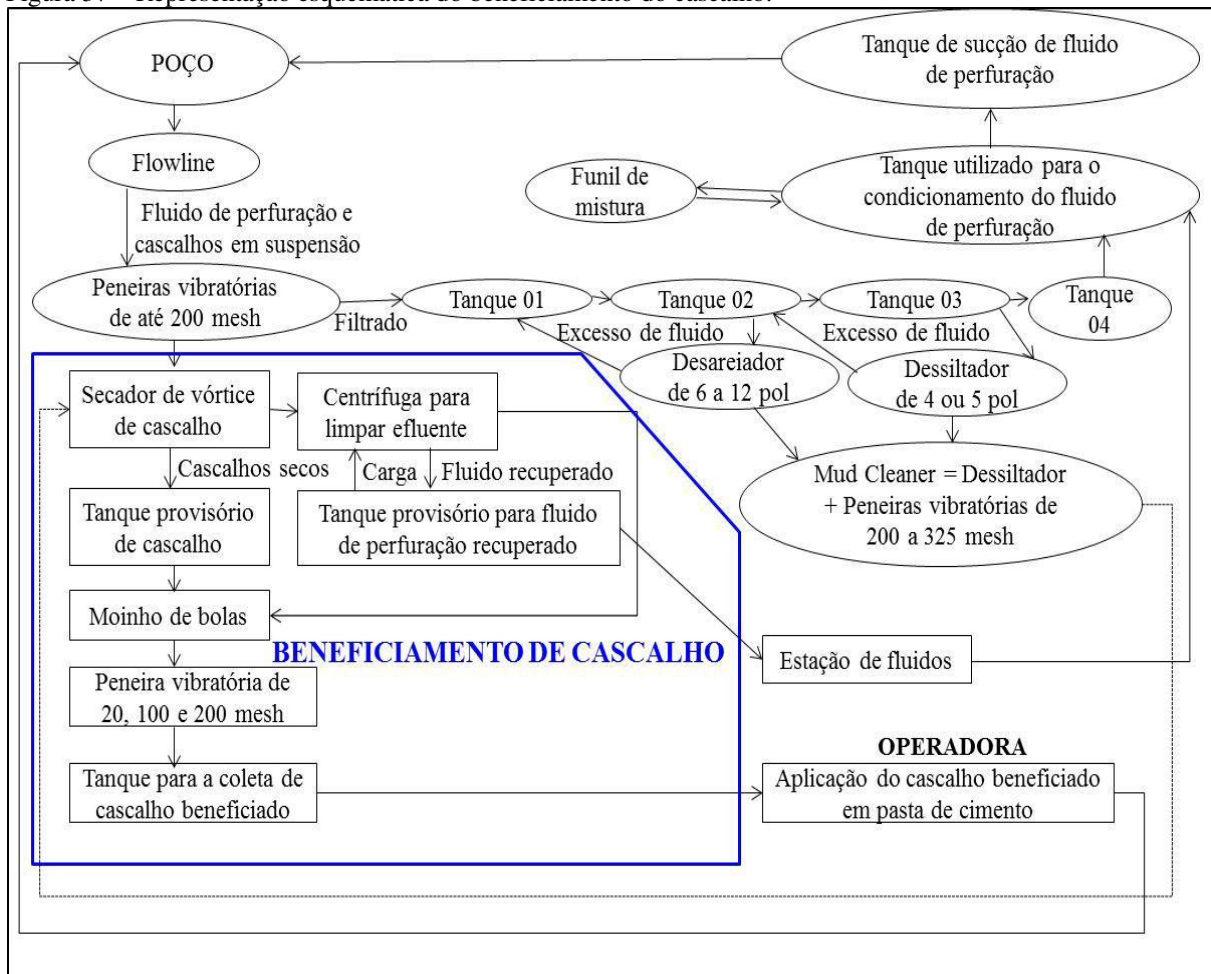
Figura 36 – Peneira vibratória.



Fonte: EPA, 2000.

A Figura 37 apresenta, através de um fluxograma, a sequência percorrida pelos cascalhos, desde a geração até a aplicação desses em pastas de cimento, proposta neste estudo.

Figura 37 – Representação esquemática do beneficiamento do cascalho.



Fonte: AUTOR, 2017.

4.5.3 Homogeneização e preparo da pasta de cimento

O procedimento de homogeneização é realizado:

- ✓ Na temperatura ambiente, utilizando o consistômetro atmosférico;
- ✓ Com aquecimento, conforme o tempo de espessamento, até a temperatura máxima de 180°F (82°C), utilizando o consistômetro atmosférico;
- ✓ Com aquecimento e pressurização semelhantes aos definidos para o tempo de espessamento, em temperaturas superiores a 180°F (82°C), utilizando o consistômetro pressurizado.

A profundidade (vertical) final do poço assumida nessa pesquisa é de 1.000 m. O gradiente geotérmico médio, utilizado dos campos de petróleo terrestres de Carmópolis, Siririzinho e Riachuelo, é de 3,65 °C/100 m (2°F/100 ft).

O critério adotado para seleção e determinação do percentual máximo de cascalhos na composição da pasta de cimento de produção se dá pela manutenção das propriedades físicas

requeridas pelas operadoras. As amostras de cascalhos, fornecidas pelo CTC e avaliadas nesta pesquisa, são resultantes da mistura de 10 amostras *in natura* coletadas em profundidades e características geológicas da formação Muribeca, membro Oiteirinhos, cujos poços utilizaram como fluidos de perfuração, na fase final da perfuração do intervalo produtor, fluidos de base sintética com n-parafina linear (parafina sintética, conhecida como n-parafina). Essas 10 amostras foram misturadas em proporções díspares com o cimento Portland classe especial, conforme demonstradas na Figura 38.

A distribuição granulométrica dos cascalhos, bem como a composição mineralógica desses, são muito heterogêneas. Portanto, com o objetivo de se obter uma maior representatividade da pesquisa realizada, a amostra de cascalhos foi moída até que toda a massa perpassasse por peneiras de 20 (841 μm), ou de 100 (149 μm) ou de 200 mesh (74 μm).

O peneiramento mecânico não deve ser realizado em mistura seca com aditivos de granulometria maior do que a abertura de uma peneira de 20 mesh (equivalente a uma abertura da tela de 0,841 mm). O objetivo do peneiramento é a remoção de partículas mais grossas que possam causar problemas nos testes de reologia, como também, identificar a presença de contaminantes.

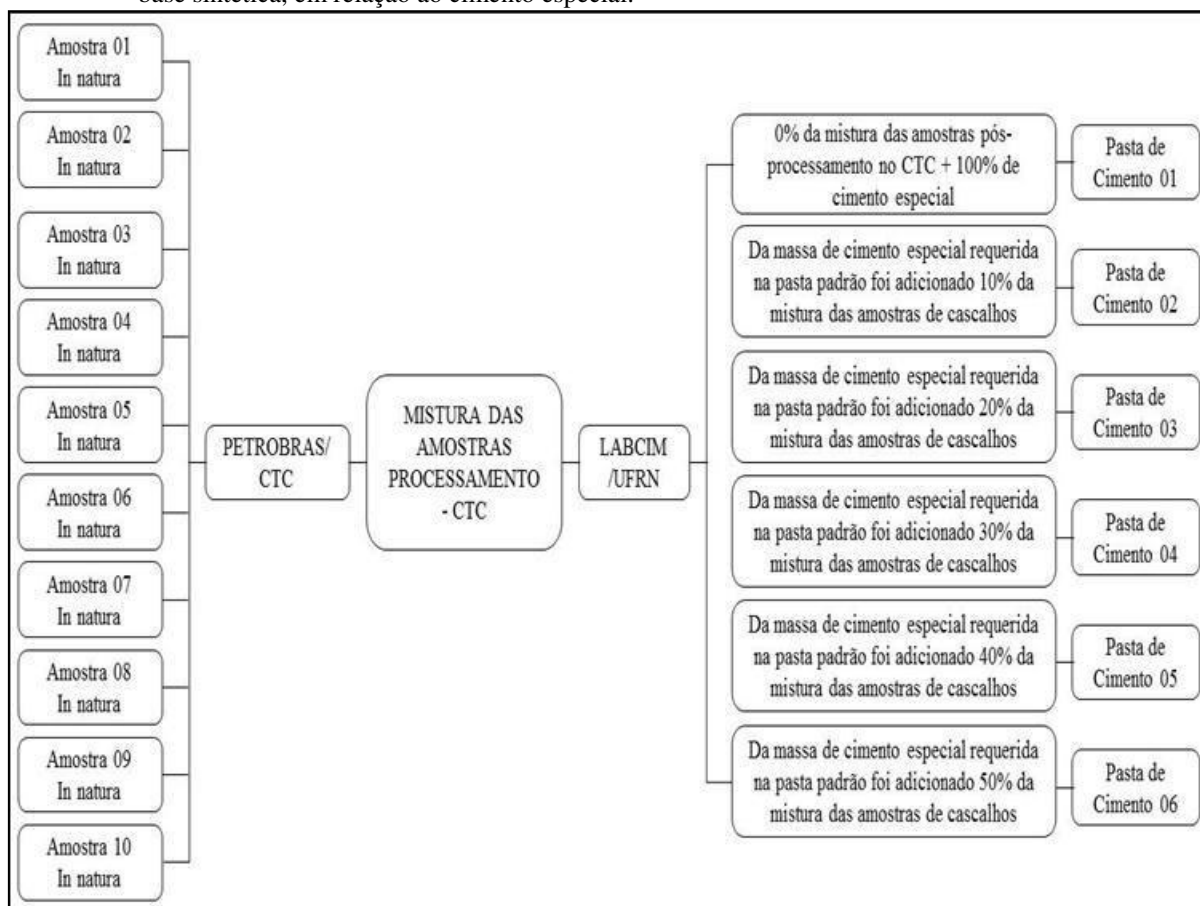
As massas de cascalhos e de cimento (Portland CPP - classe especial) devem ser previamente pesadas em recipientes distintos. A massa de cascalhos é adicionada e misturada mecanicamente em laboratório ao cimento (Portland CPP - classe especial) a seco, com o propósito de manter a mistura homogênea. Essa massa de cascalho a ser misturada ao cimento, por amostra, equivale ao percentual da massa de cimento utilizada na pasta padrão (pasta sem a adição de cascalhos em sua composição), necessária ao preparo da pasta.

Exceto na amostra padrão (pasta de cimento sem cascalho em sua composição), as demais amostras fizeram o uso de cascalho processado no CTC, fragmentado e peneirado em laboratório, atuando exclusivamente na adequação dos parâmetros técnicos requeridos pela operadora, para a utilização de pastas de cimento de produção.

Em seguida, adota-se o procedimento convencional no preparo de pasta de cimento, de acordo com Campos (2005), com as operadoras e com as companhias que realizam os serviços de cimentação e os testes laboratoriais correlatos.

Neste procedimento, calcula-se a quantidade dos componentes da pasta, de modo a ser obtido um volume de 600 cm^3 de pasta de cimento, em laboratório.

Figura 38 – Fluxograma esquemático da composição e mistura do cascalho gerado por fluido de perfuração de base sintética, em relação ao cimento especial.



Fonte: AUTOR, 2017.

No preparo da água de mistura, a introdução de aditivos líquidos é realizada dosando-os em massa. Pesa-se a água e os aditivos, levando-se em consideração a densidade de cada um. Os aditivos líquidos podem ser inseridos por intermédio de uma seringa, frasco dosador ou pipeta. Esta adição deve ser feita de acordo com a ordem de mistura da composição.

As temperaturas da água de mistura, da mistura seca de cimento com cascalhos, e da aparelhagem de mistura devem representar as condições do campo (na locação). Tais condições (como, por exemplo, o gradiente geotérmico dos campos de petróleo avaliados) devem ser reproduzidas em bancada de laboratório. Em seguida, tara-se o recipiente e pesa-se a mistura seca de cimento com cascalhos, com precisão de $\pm 0,1$ g, em balança semi-analítica. Adota-se o fator de conversão de que um pé cúbico (1 pé^3) de cimento equivalente a 94 lb de cimento. O material deve ser protegido da hidratação e carbonatação, através de tampa ou cobertura do tipo filme plástico.

Adiciona-se a mistura seca de cimento com cascalhos à água de mistura, através de funil de haste curta pela abertura central da tampa do copo do misturador. A adição deve ser realizada na velocidade de 4000 ± 200 rpm, em até 15 segundos. O tempo de adição deve ser

controlado por cronômetro ou temporizador do misturador (Figura 39). De forma ininterrupta, agita-se a pasta por 35 segundos, a uma velocidade de 12000 ± 500 rpm.

Figura 39 – Misturador de palheta com controlador de velocidade.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

4.5.4 Testes de pastas de cimento

Os testes de pastas consistem em ensaios de laboratório realizados em pastas de cimento, com o intuito de verificar as propriedades mecânicas e de escoamento desejadas. Tais propriedades, quando não apresentam valores apropriados para a aplicação requerida, são ajustadas utilizando aditivos específicos para este fim. Detalhes sobre os testes e propriedades requeridas para as pastas de cimento, com aplicação a poços de petróleo, são discutidos mais adiante.

a) Determinação da densidade absoluta

O método preferido pela indústria para a determinação da densidade absoluta de uma pasta de cimento utiliza uma balança pressurizada. A balança pressurizada opera de forma similar à balança de lama. A diferença é que um volume fixo de pasta pode ser colocado no copo sobre pressão. O objetivo de submeter a pasta de cimento sobre pressão é minimizar o efeito da presença de ar na medida da densidade da pasta.

O maior problema encontrado na medida da densidade absoluta de pasta de cimento é que, frequentemente, esse fluido possui considerável quantidade de ar incorporado quando inicialmente misturado. Pressurizando a amostra no copo, qualquer quantidade de ar incorporado reduz-se a volumes negligenciáveis, fornecendo assim uma medida de densidade aproximada em concordância com os valores que serão encontrados nas condições de fundo do poço (API RP 10B-2/ISO 10426-2, 2002). A Figura 40 mostra uma representação esquemática da balança pressurizada.

Figura 40 – Balança pressurizada, caixa, êmbolo e tampa.



Fonte: CAMPOS e VELLASCO, 2005

b) Bombeabilidade da pasta de cimento

O tempo de bombeabilidade (espessamento) é o tempo requerido para uma pasta de cimento desenvolver um determinado valor de unidade Bearden de consistência. O aparelho utilizado para medir o tempo de bombeabilidade de uma pasta de cimento a condições específicas de temperatura e pressão chama-se consistômetro (API Recommended Practice 10B-2/ISO 10426-2). O aparelho para teste de bombeabilidade deve ser um consistômetro pressurizado que possui uma célula cilíndrica para rotação da pasta, equipada com palheta estacionária acoplada, já apresentada anteriormente.

O consistômetro pressurizado (Figura 41) é composto por uma câmara de pressurização, células de teste, palheta estacionária, potenciômetro, sistema de aquecimento, bomba de pressurização, termopares, indicadores de temperatura, manômetros, cronômetro, sistema de registro gráfico e dispositivo calibrador do mecanismo do potenciômetro. A célula cilíndrica contendo a pasta de cimento se acopla externamente a um motor que gira na rotação

de 150 ± 15 rpm. Internamente à célula, a palheta estacionária imersa na pasta de cimento transmite o torque imposto pela pasta a uma mola acoplada a um potenciômetro que registra continuamente a voltagem.

Figura 41 – Consistômetro pressurizado, sem mecanismo de calibração.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

O tempo de bombeabilidade é um parâmetro calculado e representa o tempo máximo no qual a operação de cimentação pode ser realizada sem que haja risco de interrupção da operação por motivo de perda de bombeabilidade da pasta. Do ponto de vista operacional, este tempo pode ser alcançado pela adição e/ou combinação de produtos químicos específicos para este fim.

O tempo de bombeabilidade requerido para uma determinada operação corresponde à soma do tempo de bombeio mais o tempo de segurança. O tempo de bombeio é calculado com base na volumetria do poço e na vazão média de bombeio prevista para a operação. O tempo de segurança varia de 50% a 100% do tempo de bombeio, a depender das proporções em que será executada a operação. O tempo de bombeabilidade, utilizado como parâmetro neste estudo, é definido com base num poço modelo, com 1.000 m de profundidade vertical.

c) Resistência Compressiva

A resistência compressiva é a resistência de uma amostra de cimento endurecida, medida pela pressão requerida para sua quebra (API 10B-2/ISO 10426-2, 2002). Tem valor inversamente proporcional à razão água-cimento, e não necessariamente à densidade. Uma boa resistência à compressão deve garantir a perfeita vedação dos canhoneados.

Os testes de resistência compressiva em poço simulado, aqui descritos, podem ser usados para testar a resistência de cimentos ou misturas de cimentos à retrogressão de resistência termicamente induzida. A amostra de cimento ou de mistura de cimentos é exposta a pressão e temperatura por períodos de tempo onde é monitorada a variação da resistência compressiva. O procedimento envolve a comparação da resistência compressiva, avaliada após o período inicial (24 h, 48 h ou 72 h), com a resistência compressiva observada após períodos ou algum período estendido (tal como 28 dias).

Cimentos ou misturas de cimentos que exibem redução da resistência compressiva depois de um dado período podem ser considerados como cimentos que apresentam retrogressão de resistência compressiva. O limite de temperatura comumente citado para retrogressão de resistência termicamente induzida é 110 °C (230 °F), embora casos com desvios deste valor tenham sido reportados (API 10B-2/ISO 10426-2, 2002). Retrogressão da resistência compressiva é algo indesejado para cimentação, e é definida como a redução da resistência compressiva e aumento da permeabilidade de um cimento causado pela exposição a temperaturas maiores que 110 °C (230 °F), segundo a API 10B-2/ISO 10426-2, 2002.

Ainda segundo a API10B, os ensaios de resistência compressiva podem ser conduzidos de duas formas: ensaio destrutivo, normatizado pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM), de número C109, onde utiliza um molde metálico em forma de cubo para cura da amostra de cimento, que, depois de endurecida, é submetida à compressão em uma prensa hidráulica; e ensaio não destrutivo, descrito na ISO 10426-1, no qual utiliza um aparelho que emite sinal sônico através da amostra durante processo de endurecimento. Este método correlaciona o tempo de trânsito da onda através da amostra com a resistência compressiva, por meio de correlações matemáticas.

Neste estudo, o método de análise utilizado é o não destrutivo, seguindo as técnicas experimentais e equipamentos recomendados pela API (API RP 10B, 2002).

d) Reologia

As propriedades reológicas estão relacionadas ao comportamento mecânico da pasta. O ensaio de fluxo avalia a tensão de cisalhamento a uma dada taxa de cisalhamento (ou reciprocamente). Com a variação da tensão ou taxa de cisalhamento, a curva de escoamento pode ser traçada e, por meio desta ou através de equações de estado reológico, as propriedades reológicas podem ser definidas: tensão de escoamento (tensão mínima necessária para iniciar o escoamento do material) e viscosidade (resistência ao escoamento). O comportamento reológico pode ser apresentado por curvas de taxa de cisalhamento em função da tensão de cisalhamento ou taxa de cisalhamento em função da viscosidade.

O entendimento e controle nas operações com cimento visam aumentar a eficiência com que a pasta de cimento desloca o fluido presente no espaço anular, perante determinado regime de fluxo, e a real pressão exercida sobre as paredes do poço.

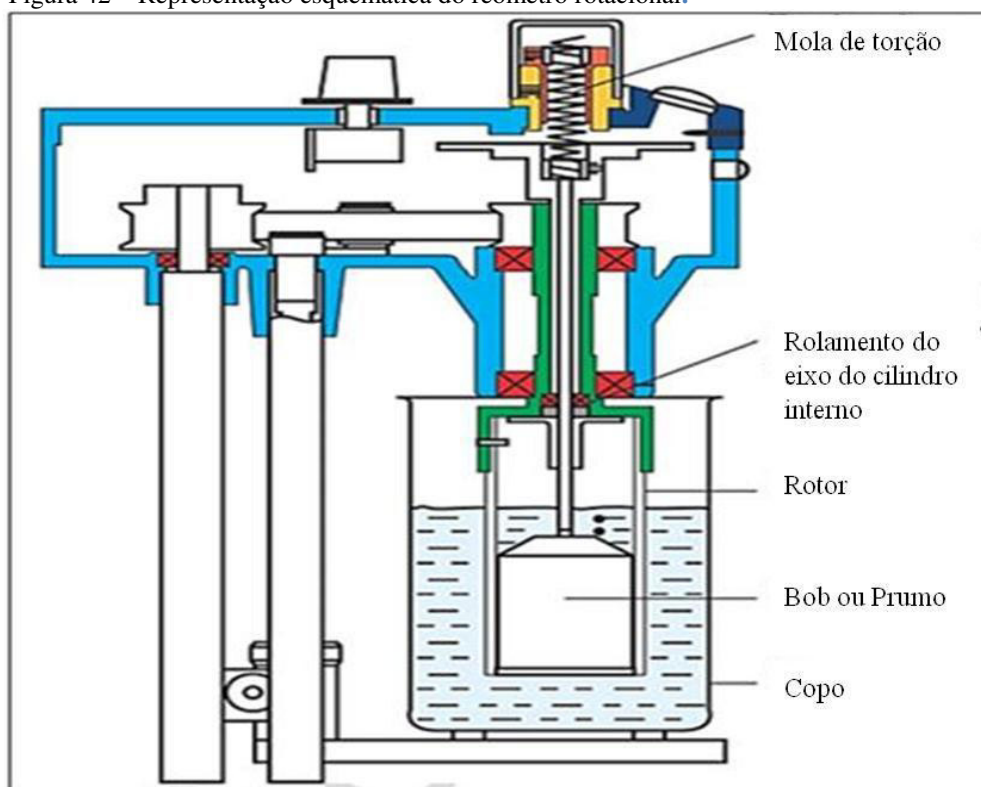
Os modelos reológicos que melhor descrevem o comportamento do que ocorre numa pasta de cimento, no intervalo de estados entre o fluido viscoso e o sólido elástico, são: Bingham e Potência.

Um típico reômetro rotacional, não pressurizado, deve ser utilizado para medir as propriedades reológicas de fluidos usados em cimentação de poços. Este aparelho consiste em um cilindro interno, conhecido como “bob”, localizado no centro de um rotor cilíndrico externo, denominado de rotor.

A largura do espaço entre o “bob” e o rotor é fixada para uma dada configuração de “bob”/rotor. O rotor é capaz de girar a várias velocidades rotacionais específicas. A rotação do rotor atua sobre o fluido a ser testado, o qual por sua vez transmite o torque para o “bob”.

O “bob” é montado num eixo que é conectado a uma mola de torção, a qual retém o movimento. O ângulo de deflexão do “bob” devido ao torque é medido em graus (API 10B-2/ISO 10426-2, 2002). Uma representação esquemática do reômetro rotacional pode ser visualizada na Figura 42.

Figura 42 – Representação esquemática do reômetro rotacional.



Fonte: CAMPOS E VELLASCO, 2005.

e) Filtrado

O teste de perda de filtrado é o experimento através do qual se determina a perda de fluido de uma pasta de cimento quando posicionada contra uma tela filtrante de 325 mesh a 1000 psi. O teste de filtrado estático visa medir a taxa de desidratação da pasta. A redução do filtrado protege formações sensíveis a dano e gera reboco de menor espessura e baixíssima permeabilidade.

Para testes a temperaturas menores ou iguais a 88 °C (190 °F), os mesmos podem ser realizados utilizando a célula de perda de fluido, depois de condicionar a pasta de cimento em um consistômetro pressurizado ou atmosférico, ou numa célula de perda de fluido agitada. Independentemente de a pasta ter sido condicionada em um consistômetro ou numa célula de perda de fluido agitada, o valor de perda de filtrado é determinado em condições estáticas.

O cálculo do filtrado é expresso em mililitros por 30 minutos. Para testes realizados entre os 30 minutos, sem *blowout* (quando todo líquido é expelido para fora da célula de teste), o volume de filtrado coletado é medido e o dobro do valor de volume verificado é relatado como sendo o resultado do filtrado. Para testes onde ocorre o *blowout* antes dos 30 minutos de teste, o valor do filtrado é calculado pela Equação 03, conforme a API Recommended Practice 10B-2/ISO 10426-2.

$$\text{Perda de Filtrado} = V_t \times \frac{10,944}{\sqrt{t}} \quad (03)$$

Onde:

- Perda de filtrado, ou simplesmente filtrado, definido como a perda de fluido durante 30 min, em cm³.
- V_t = volume de filtrado (em cm³), coletado quando ocorre o *blowout*.
- t = tempo, em minutos, até o *blowout*.

f) Água livre

O teste de água livre é o ensaio pelo qual se verifica a separação por decantação do fluido contido na pasta de cimento. Quando os sólidos de uma pasta não estão completamente dispersos na suspensão, pode ocorrer migração ascendente da água, que se acumula em bolsões nas partes mais elevadas da coluna de cimento. O fenômeno cria canais e altera a pasta ao longo da coluna. Este experimento utiliza o consistômetro atmosférico ou o consistômetro pressurizado para condicionar a pasta (agitação e controle de temperatura da pasta antes do teste), além do tubo de vidro não deformável, inerte à pasta de cimento, para realização do teste. Os procedimentos adotados nos testes estão descritos na API Recommended Practice 10B-2.

4.5.5 Consciência ambiental e cidadania

O estudo ora apresentado possibilita a elaboração de um projeto alinhado com as diretrizes de programas ambientais existentes no país, demonstrando o pioneirismo, o potencial transformador, a capacidade de articulação entre projetos sociais com a participação da comunidade. Permite ainda avaliar o impacto socioambiental em termos quantitativos e qualitativos das transformações e dos avanços consistentes, tanto nas condições ambientais, como nas comunidades.

a. Planejamento para sustentabilidade

A sustentabilidade ecológica se mostra como um critério normativo para reconstrução da ordem econômica, como uma condição fundamental para a sobrevivência do homem e um suporte para chegar a um desenvolvimento duradouro, questionando as próprias bases de produção. (LEFF apud CUNHA, 2015). O aproveitamento do cascalho de perfuração como matéria-prima de uma pasta de cimento contribui para a redução do acúmulo desse resíduo em

aterros, por exemplo. Como consequência direta do emprego de cascalho em pastas de cimento, há redução no consumo de cimento Portland e produtos químicos em cimentações primárias de petróleo, diminuindo a demanda atual dos recursos naturais necessários à produção destes produtos. Tal fato produz um resultado econômico positivo, visto que reduz o custo da pasta de cimento por volume produzido, colabora com a preservação do meio ambiente e, por fim, favorece a geração de emprego e renda através do beneficiamento do cascalho. O beneficiamento proposto neste estudo não é praticado pela indústria, até o momento.

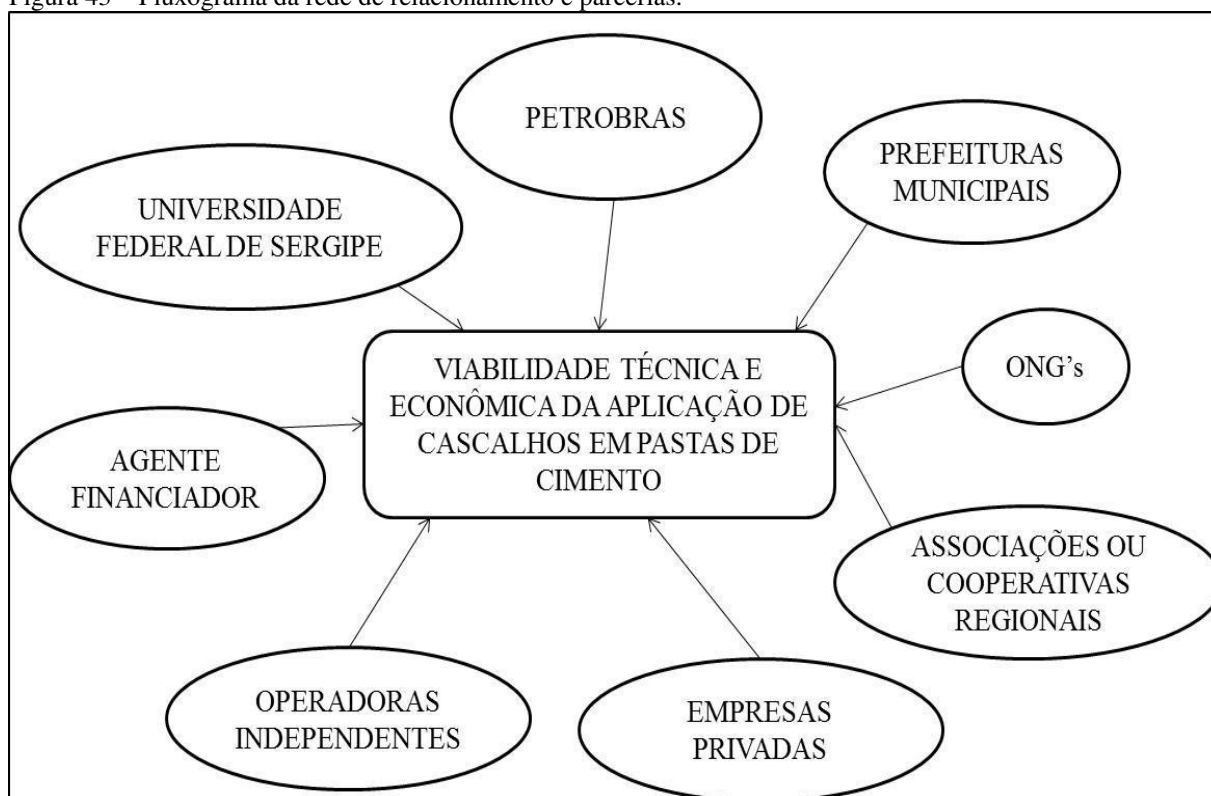
Parte fundamental deste estudo, na área do Programa em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA, da Universidade Federal de Sergipe, consiste na busca do equilíbrio entre as atividades reguladas da indústria de petróleo e a preservação dos diversos ecossistemas onde essa indústria opera. O planejamento de um projeto sustentável, a partir desse estudo, deve ser desenvolvido em consonância com as diretrizes do IBAMA e do órgão estadual do meio ambiente, ADEMA.

b. Projeto sustentável – Rede de relacionamento e parcerias

A rede de relacionamento apresentada na Figura 43 mostra as articulações e parcerias que poderão facilitar a implantação das etapas do projeto, assim como possibilitarão sua continuidade e a formação de novas ideias. Trata-se de uma nova forma de organização social, capaz de articular pessoas e grupos em torno de objetivos comuns de forma democrática.

A finalidade dessa rede é enriquecer a atuação de cada integrante, fortalecer a posição deste no grupo, manter a intercomunicação constante entre as instituições participantes e as pessoas, que estão continuamente trocando ideias para desenvolver um comportamento socioambiental.

Figura 43 – Fluxograma da rede de relacionamento e parcerias.



Fonte: AUTOR, 2017.

c. Projeto sustentável - Recursos necessários

Os recursos aqui elencados são destinados ao beneficiamento dos cascalhos, para a aplicação proposta nesse estudo, no âmbito regional ou até mesmo nacional. São eles:

- Secador de Cascalho – possui uma centrífuga vertical de alta velocidade, com capacidade de processar quantidades variáveis de cascalhos e fluidos, de até 60 t/h. Os sólidos secos são descarregados do secador com um teor de óleo entre 1 e 5 % em peso.
- Centrífuga de decantação - separa o fluido de perfuração dos sólidos finos (Figura 44). Este fluido é retornado para o sistema de fluido da sonda em atividade. Uma fração do fluido de perfuração recuperado na centrífuga pode ser usada na diluição, se necessária, no secador de cascalho. Os sólidos oriundos da centrífuga podem ser recolhidos no mesmo transportador dos sólidos empregado no secador.
- Moinho de bolas – com base no estudo efetuado, concluiu-se que a melhor alternativa para a obtenção de um material com baixa granulometria é um moinho de bolas de aço.
- Esteira transportadora de cascalhos – trata-se de um sistema de transporte destinada à movimentação dos cascalhos entre os equipamentos da ETC.

- Peneira vibratória com jogo de peneiras (20, 100 e 200 mesh) – para segregar o sólido particulado (cascalho) que possua tamanho superior a 20 mesh (0,841 mm ou 841 μm).

Figura 44 – Centrífuga de decantação.



Fonte: TIANRUI SOLIDS CONTROL, 2017.

- Equipamentos auxiliares como balança, estufa, duas provetas graduadas (1000 mL cada), densímetro graduado de bulbo simétrico, termômetro e cronômetro.

Pessoal qualificado – formar recursos humanos especializados, por meio da concessão de bolsas de estudo de nível médio, graduação, mestrado e doutorado, com trabalhos finais relacionados ao projeto, com o objetivo de preparar um grupo de técnicos capacitados para operar os equipamentos, e com um quantitativo que atenda à demanda regional existente.

Esses técnicos podem ser treinados pelos próprios fabricantes (ou fornecedores) dos equipamentos acima mencionados.

O dimensionamento do investimento necessário à implantação do projeto proposto (Figura 45) depende das políticas públicas formuladas para a região, fundamentais para a implantação e a consolidação de projetos socioambientais de instituições da sociedade civil brasileira, assim como do plano de negócios das operadoras para a região.

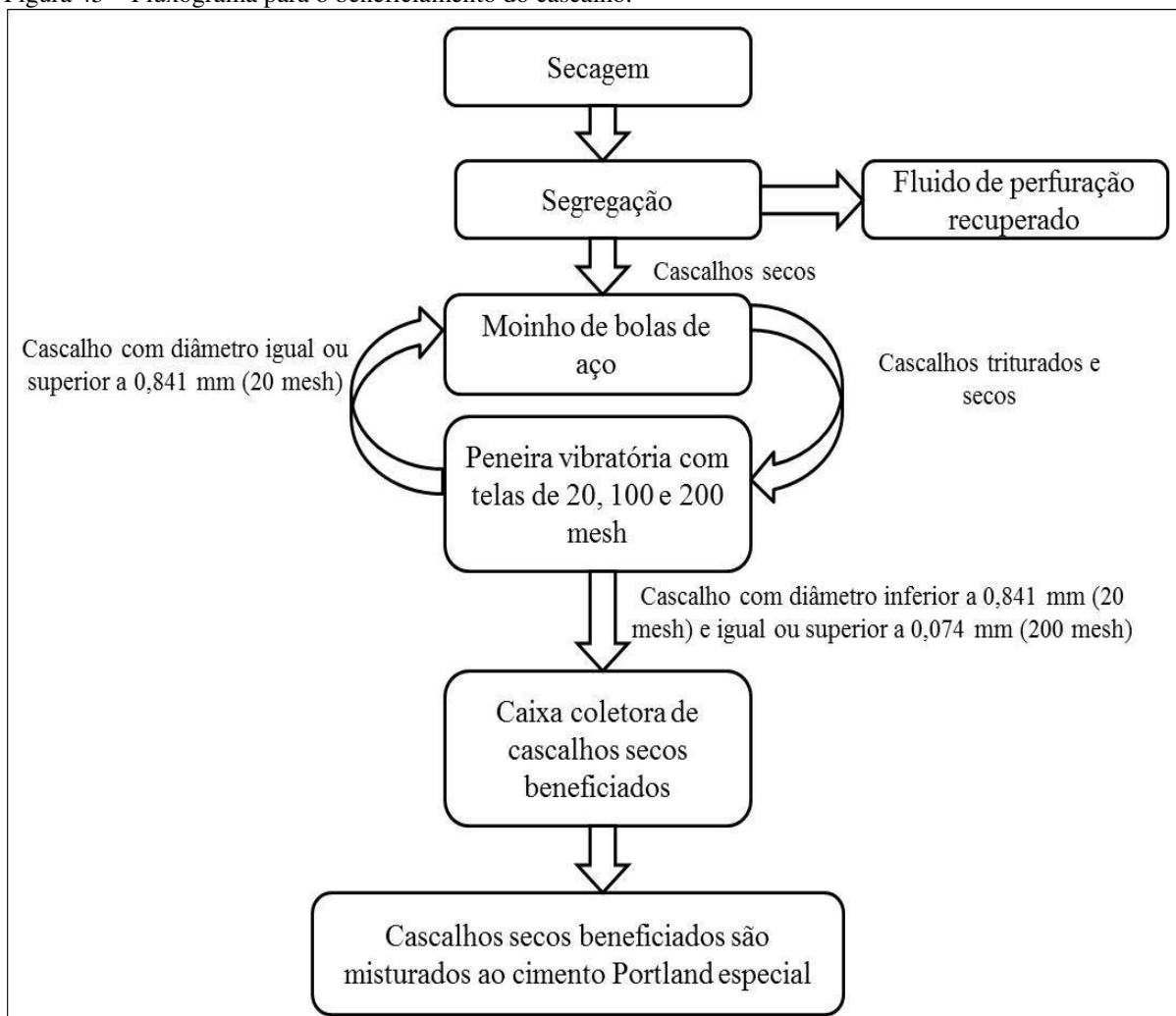
d. Projeto sustentável – Processo de avaliação

O processo de avaliação do projeto proposto deve ter um caráter permanente e deve contemplar formas participativas de avaliação que não incluam somente a equipe do projeto, mas todos os seus integrantes, parceiros e financiadores. As avaliações mais relevantes são:

- Avaliação de resultados: constatar o cumprimento dos objetivos e das metas pactuadas, no período de tempo previsto. Deve-se considerar uma visita ao local

do projeto, a verificação dos relatórios técnicos e fotográficos, documentos, procedimentos operacionais e de segurança, entre outros.

Figura 45 – Fluxograma para o beneficiamento do cascalho.



Fonte: AUTOR, 2017.

- Avaliação do conteúdo: procedimento de análise expresso em documentos escritos tais como: minutas, relatórios mensais de campo e outros documentos similares. A análise pode ter uma abordagem qualitativa ou quantitativa.
- Avaliação de processo: avaliar a gestão do projeto e avaliar a eficiência do procedimento de trabalho aplicado para alcançar os objetivos. A avaliação revela a qualidade, a coerência e a viabilidade das técnicas e dos recursos disponíveis utilizados durante a execução do projeto.
- Avaliação de impacto: descrever os impactos sociais e ambientais que os objetivos propostos causam na área do projeto e as mudanças comportamentais percebidas no público-alvo e na comunidade.

e. Projeto sustentável – Indicadores

Os indicadores são ferramentas que avaliam se os resultados propostos foram atingidos. São instrumentos fundamentais para o processo de avaliação de projetos socioambientais.

Pode-se estabelecer como indicador quantitativo para o projeto, ora em comento, o volume de cascalhos secos beneficiados e fornecidos à indústria, de acordo com a demanda regional existente.

Como indicador qualitativo ou subjetivo, pode-se designar a manutenção da normalização granulométrica dos cascalhos, dentro dos padrões requisitados pela indústria, conforme projetado, assim como, designar o Índice de Desenvolvimento Humano do Município (IDHM), onde se encontra instalada a ETC. Tais parâmetros podem ser monitorados pela equipe técnica envolvida.

f. Projeto sustentável – Agente financiador

Atualmente, boa parte das empresas reconhece a importância de atuar no âmbito da responsabilidade social, proporcionando recursos financeiros e pessoais, nas soluções de problemas sociais, ambientais e econômicos. Os recursos podem advir-se das seguintes fontes:

Recursos públicos – oriundos de órgãos governamentais brasileiros, sejam eles municipais, estaduais ou federais, e internacionais. São exemplos desta modalidade:

- Recursos a fundo perdido;
- Linhas de crédito;
- Incentivos fiscais.

Os programas socioambientais promovidos pelo governo federal, acessíveis a projetos como este, têm como meta fortalecer a sociedade civil e a democracia, impulsionando a inclusão social de comunidades tradicionalmente discriminadas, estimulando as agendas sustentáveis de desenvolvimento e implantação de tecnologias sociais, através da produção de conhecimentos técnico e científico, em sinergia com políticas públicas e pautas da sociedade civil.

Recursos privados - são decorrentes das mais distintas instituições, como, por exemplo:

- Empresas financiadoras de projetos socioambientais;
- Organizações não governamentais (ONGs);

- Associações religiosas;
- Fundações.

5 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o progressivo interesse na defesa do meio ambiente, vários questionamentos têm sido propostos para o beneficiamento de solos contaminados por hidrocarbonetos. Os avanços tecnológicos conquistados até o momento devem ser avaliados quanto às vantagens, desvantagens e custo de implantação. Um estudo específico deve ser realizado para cada localidade com as suas peculiaridades, a fim de identificar o método de tratamento que ofereça uma melhor relação de sustentabilidade ambiental, social e econômica.

Uma condição fundamental para o sucesso do aproveitamento dos cascalhos consiste na cominuição dos mesmos, visto que, com a diminuição do diâmetro das partículas do solo, a área da superfície resultante aumenta consideravelmente. Dessa forma, alteram-se algumas propriedades físicas relacionadas à área superficial, como por exemplo, a adsorção, a expansão e a plasticidade. O aumento da superfície específica do cascalho possibilita uma mistura uniforme com o cimento seco e a manutenção do enquadramento técnico determinado pela operadora, para a pasta de cimento.

As avaliações técnica e econômica demonstradas a seguir, resultantes de ensaios laboratoriais e análise de viabilidade econômica do estudo desenvolvido, possibilitam legitimar esta pesquisa, apresentando-a como um modelo factível de gestão sustentável, fundamentada nos procedimentos metodológicos descritos, e alinhada de maneira sistêmica com as práticas operacionais implantadas pela indústria do petróleo, no século XXI.

O tema central desta tese é a sustentabilidade da pesquisa ora apresentada, buscando o equilíbrio da proteção ambiental, com o desenvolvimento social e econômico. A visão de sustentabilidade emerge da constatação do meio ambiente como arrimo, premissa e potencialidade para o processo de produção.

5.1 Avaliação técnica

Os testes laboratoriais realizados tiveram como um dos objetivos específicos, agregar o percentual máximo de cascalho na composição da pasta de cimento, desde que fossem mantidas as características físicas requeridas pelas operadoras. Os ensaios foram realizados com 3 bateladas distintas de cimento com cascalhos. Foram utilizadas as bateladas 127, 129 e 130.

5.1.1 Formulação

Para a obtenção das diversas propriedades de uma pasta de cimento, fixa-se a massa específica da mesma e as concentrações dos aditivos sólidos e líquidos. Monta-se uma planilha de cálculo onde devem constar todos os componentes químicos da pasta, com as suas respectivas concentrações.

Os resultados das composições das pastas de cimento avaliadas, sem e com cascalhos, de acordo com o enquadramento técnico já mencionado, são apresentados nas Tabelas 04 e 05.

Tabela 04 – Formulação da pasta de cimento selecionada, sem cascalhos em sua composição.

Produto	Massa (lb _m)	Volume Específico (gal/lb _m)	Volume Absoluto (gpc)
Cimento CPP-Classe Especial	94,00	0,0382	3,5908
Cascalho	0,00	0,0566	0,0000
Anti-espumante	0,05	0,1200	0,0065
Dispersante	0,40	0,1135	0,0450
Controlador de Filtrado	0,42	0,0880	0,0372
Retardador	0,12	0,1030	0,0120
Água Doce	42,74	0,1202	5,1373
Sub-Total	137,73		8,8288
Densidade (lb _m /gal)	15,60		
Rendimento (pé ³ /pé ³)	1,180		
FAC (%)	45,468		
FAM (gpc)	5,238		

Fonte: AUTOR, 2017.

Tabela 05 – Formulação da pasta de cimento selecionada, com 10% de cascalhos em sua composição.

Produto	Massa (lb _m)	Volume Específico (gal/lb _m)	Volume Absoluto (gpc)
Cimento CPP-Classe Especial	94,00	0,0382	3,5908
Cascalho	9,40	0,0566	0,5320
Anti-espumante	0,05	0,1200	0,0065
Dispersante	0,40	0,1135	0,0450
Controlador de Filtrado	0,42	0,0880	0,0372
Retardador	0,12	0,1030	0,0120
Água Doce	43,99	0,1202	5,2885
Sub-Total	148,38		9,5120
Densidade (lb _m /gal)	15,6		
Rendimento (pé ³ /pé ³)	1,272		
FAC (%)	46,805		
FAM (gpc)	5,389		

Fonte: AUTOR, 2017.

5.1.2 Massa específica

Todas as pastas de cimento foram testadas em laboratório com a massa específica de 15,6 lbm/gal. Este valor é adotado pela operadora nas cimentações de produção dos poços terrestres, por atender às reivindicações técnicas e de segurança dos mesmos;

5.1.3 Tempo de espessamento (ou consistometria)

Os resultados dos testes de consistometria, efetuados neste estudo, estão de acordo com o enquadramento técnico estabelecido pela principal operadora do país, conforme apresentado na Tabela 06. O tempo de espessamento estendido da batelada 129 se deveu ao fato de os cascalhos misturados com o cimento a seco possuírem uma superfície específica menor (ou seja, um diâmetro médio dos cascalhos maior que os misturados com os cimentos das demais bateladas), com granulometria de 20 mesh (abertura de 0,841 mm).

Tabela 06 – Testes de consistometria das pastas avaliadas no LabCim/UFRN.

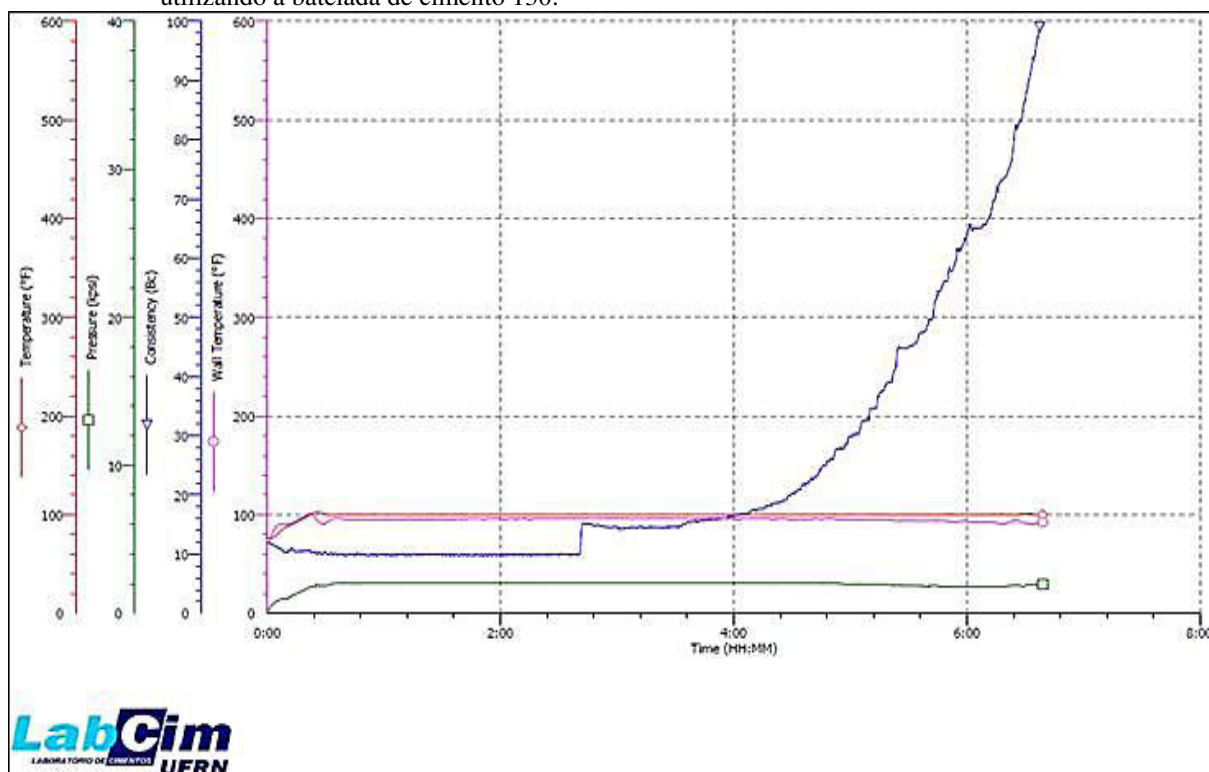
CONSISTOMETRIA		
Batelada	Percentual de cascalhos adicionados	Tempo de Espessamento
130	0%	6h35
130	10%	8h15
127	10%	8h35
129	10%	11h50

Fonte: AUTOR, 2017.

A variação no tempo de espessamento aceitável pelas operadoras dependerá do cenário específico de cada poço (por exemplo: poço produtor de óleo, poço que recebe injeção cíclica de vapor etc.). Geralmente, o tempo de espessamento oscila entre 4 e 12 horas, nas condições de fundo de poço (adotando, conforme procedimento técnico, a temperatura de circulação de fundo de poço). As cartas apresentadas nas Figuras 46, 47, 48 e 49 foram produzidas nos testes de consistometria das pastas de cimento com cascalho, avaliadas pelo consistômetro pressurizado, o qual simula as condições de temperatura e pressão utilizadas na operação. O consistômetro pressurizado mede a consistência da pasta de cimento através do torque equivalente ao grau de deflexão da mola do potenciômetro. Na ordenada da Figura 46 são monitorados os seguintes parâmetros: temperatura, pressão e consistência da pasta de cimento avaliada e a temperatura da célula do consistômetro pressurizado. Na abcissa, apresenta-se o intervalo de tempo transcorrido para a realização do teste.

Após 2 horas e 45 minutos de teste, o comportamento foi alterado, apresentando um maior valor de unidade de consistência (U_c), indicando a presença de uma estrutura mais aglomerada, resultado dos efeitos de consolidação, ou seja, atuação de fenômenos físicos (fenômenos de aglomeração).

Figura 46 – Teste de consistometria da pasta de cimento padrão (pasta sem cascalho em sua composição), utilizando a batelada de cimento 130.



Fonte: AUTOR, 2017.

As propriedades físicas do solo influenciam em como o cascalho atua na composição da pasta de cimento. O conhecimento destas propriedades físicas permite a compreensão de muitos aspectos e comportamento dos resultados obtidos. Pode-se observar que, na Figura 47, a adição do cascalho à pasta de cimento, na batelada 130, resultou no aumento do tempo de espessamento da pasta em aproximadamente 1 h 40 min. Tal diferença se deve a uma maior plasticidade e a superfície específica (m^2/kg) das partículas aglomeradas, em virtude da adição de cascalho ao cimento. A diferença existente entre a granulometria do cimento (com diâmetro médio dos grãos de 0,044 mm ou 325 mesh) e a granulometria do cascalho adicionado ao cimento (com diâmetro dos grãos, após o peneiramento em laboratório, oscilando de 0,074 mm a 0,841 mm), em especial, a distribuição granulométrica dos cascalhos adicionados à pasta, também produz tal comportamento.

A superfície específica representa o somatório da área das partículas por unidade de massa do cimento (e impurezas). Esta é inversamente proporcional ao tempo de espessamento e à água livre, e é diretamente proporcional à viscosidade, ao limite de escoamento e à resistência à compressão;

A composição granulométrica do cascalho misturado ao cimento tem grande influência nas propriedades da pasta de cimento.

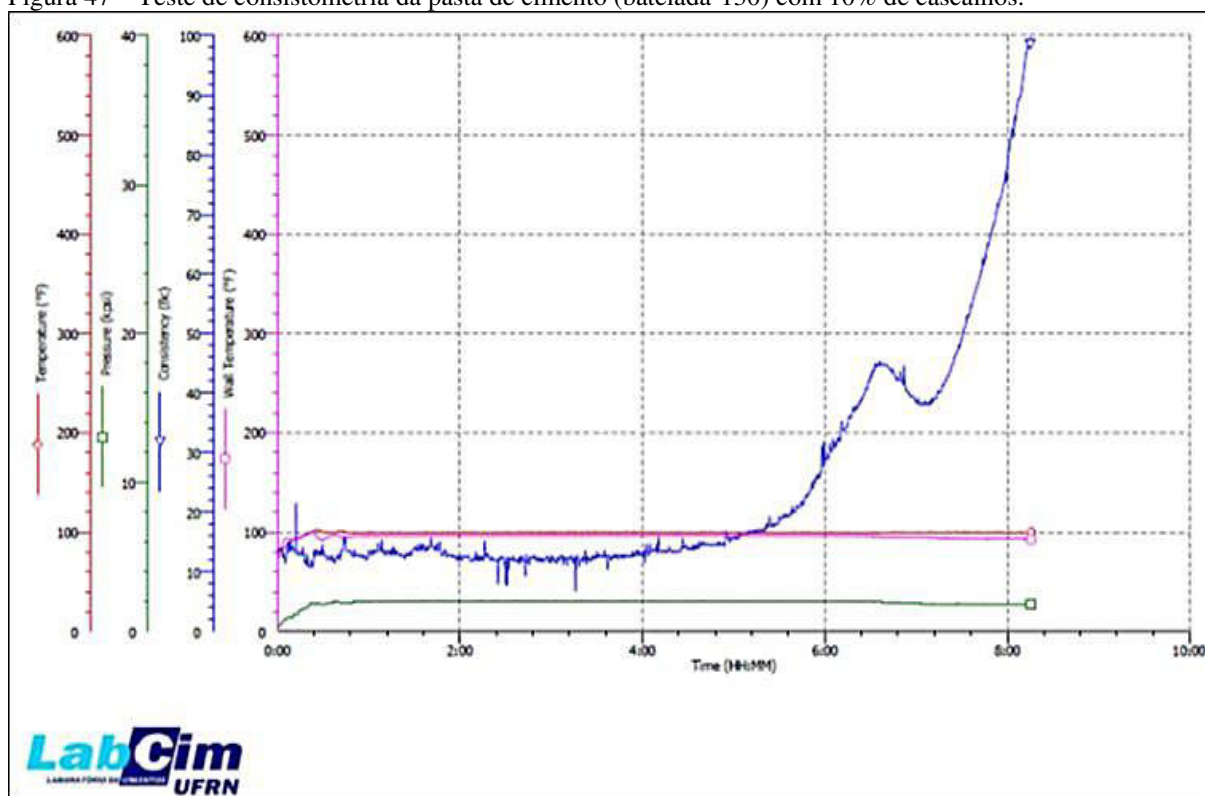
As propriedades de parte do subsolo como contração e expansão, capacidade de retenção de água, plasticidade, adsorção de elementos químicos e resistência são dependentes do tipo e da quantidade de argila presente no mesmo.

Os cascalhos derivados de formações com texturas mais finas, mais argilosas, possuem uma maior capacidade de retenção de água, ou nutrientes, e se mantêm unidos, formando uma massa mais coesa. Possuem uma consistência plástica em presença de água e uma consistência dura quando secos.

Outras características igualmente relevantes, em comparação com cascalhos originários de formações com texturas mais grossas (arenosas), são: densidade aparente menor, porosidade total maior, superfície específica elevada (área superficial para uma dada massa de partículas) e maior capacidade de troca iônica (SILVA, 2015).

Após o preparo e mistura, a fluidez das pastas avaliadas permanece quase constante, nas quatro primeiras horas de teste (Figuras 47, 48 e 49), com um ganho de consistência pouco expressivo. A ocorrência das reações de hidratação de forma contínua a partir da mistura do cimento com cascalho e a água de mistura, com velocidade relativamente baixa, ocorre com perda progressiva de plasticidade da pasta. O teor de impureza presente no cimento, assim como a granulometria do cascalho influenciam significativamente na plasticidade da pasta de cimento com cascalho. Quanto menor o diâmetro médio das partículas de cascalhos presentes na composição da pasta de cimento, mais uniforme será a perda de plasticidade desta. A pega (ou endurecimento) se caracteriza pela perda de plasticidade da pasta de cimento.

Figura 47 – Teste de consistometria da pasta de cimento (batelada-130) com 10% de cascalhos.

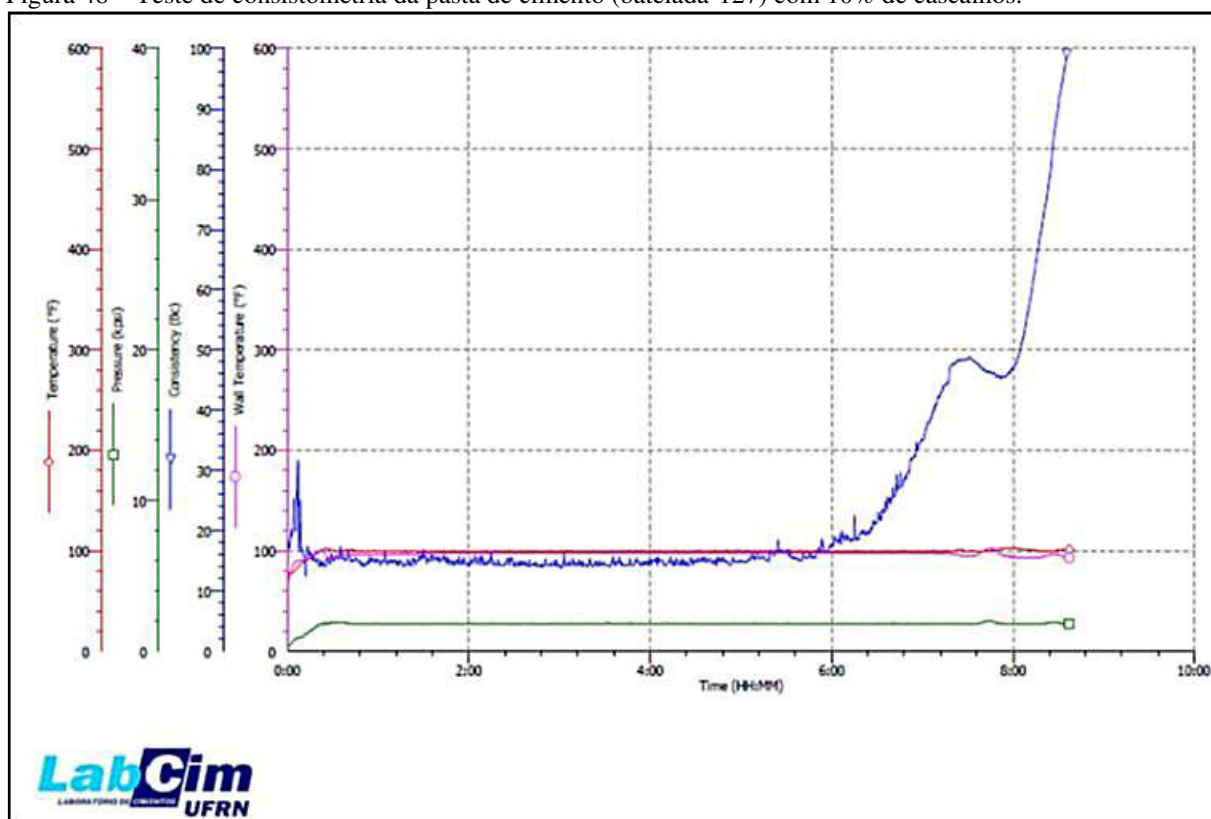


Fonte: AUTOR, 2017.

Testes adicionais de consistência (ou tempo de espessamento) foram efetuados posteriormente, utilizando o cimento da batelada 127, com 10% de cascalhos em sua composição (Figura 48), mantendo-se os demais componentes (e concentrações respectivas) da pasta de cimento, como também, usando-se o cimento da batelada 129, com 10% de cascalhos em sua composição (Figura 49), e, do mesmo modo, mantendo-se os demais componentes (e concentrações respectivas) da pasta de cimento.

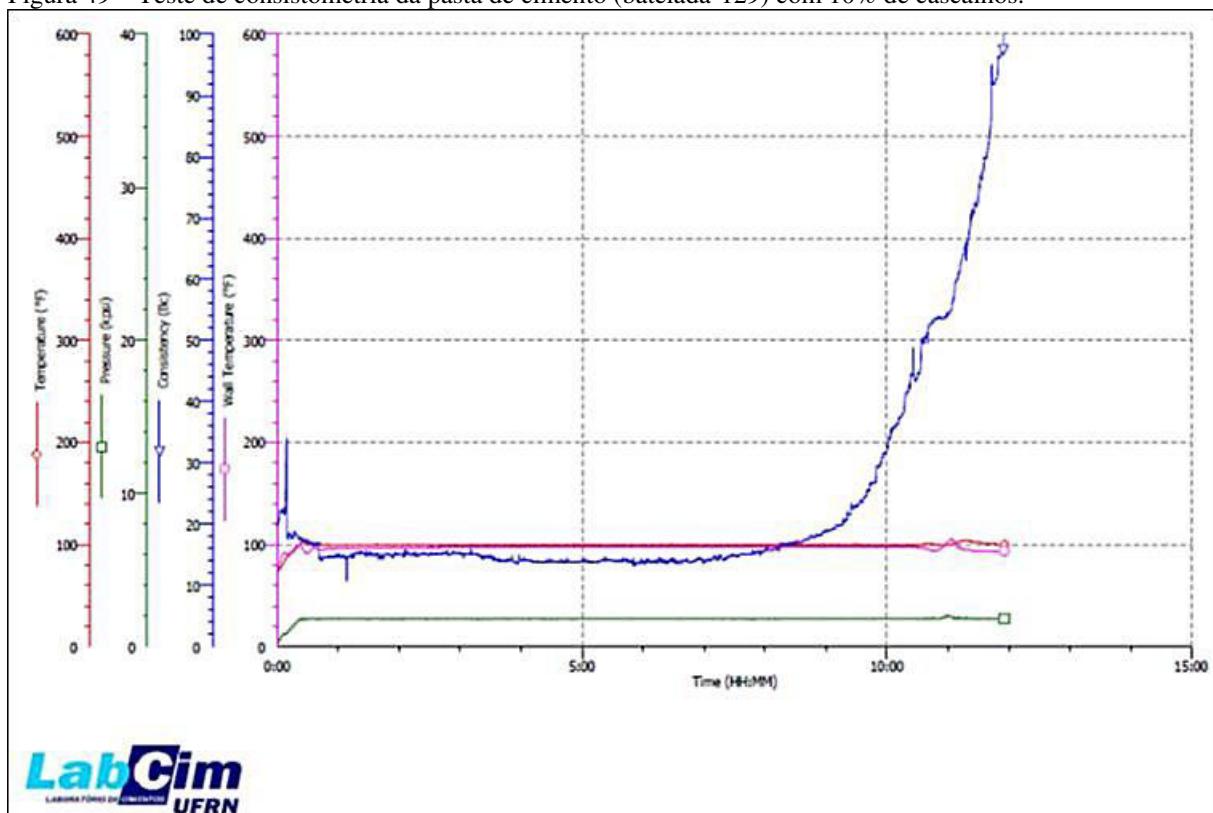
Pode-se observar na Figura 49 que o tempo de espessamento da pasta aumenta em relação aos tempos de espessamento anteriormente apresentados. Tal desempenho se deve à redução na superfície específica do cascalho (com diâmetro médio dos grãos, após o peneiramento em laboratório, mais próximo a 0,841 mm ou 20 mesh) misturado ao cimento.

Figura 48 – Teste de consistometria da pasta de cimento (batelada-127) com 10% de cascalhos.



Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 49 – Teste de consistometria da pasta de cimento (batelada-129) com 10% de cascalhos.



Fonte: AUTOR, 2017.

5.1.4 Filtrado

Esta informação possibilita estimar a vulnerabilidade da pasta de cimento em perder parte de sua fase aquosa para a formação.

Adotando os procedimentos laboratoriais requeridos pela indústria de petróleo, para a determinação da perda de fluido em meio estático, seguem abaixo os valores obtidos:

- Cimento – Batelada 127 (com 10% de cascalhos): 103 mL/30 min;
- Cimento – Batelada 129 (com 10% de cascalhos): 106 mL/30 min;
- Cimento – Batelada 130 (com 10% de cascalhos): 102 mL/30 min;
- Cimento – Batelada 130 (sem cascalhos): 84 mL/30 min;

O requisito técnico da operadora para o filtrado é que este esteja situado entre 80 a 150 mL, no período de tempo máximo de até trinta minutos. Portanto, as pastas de cimento analisadas encontram-se enquadradas, conforme requisito técnico operacional da operadora.

5.1.5 Teor de água livre

É determinado após o repouso de 250 mL de pasta de cimento, em duas horas, à temperatura ambiente.

Nas três bateladas de cimento analisadas, com 10% de cascalhos na composição da mesma, o percentual obtido de volume da fase sobrenadante sem característica cimentante, foi de zero por cento (0 %). Portanto, não há redução no volume efetivo das pastas de cimento avaliadas.

5.1.6 Reologia

Inicialmente, os testes de reologia das pastas de cimento avaliadas (com e sem cascalhos) são os primeiros a serem realizados, devido aos baixos custos envolvidos e à agilidade na obtenção dos resultados. A pasta de cimento sem cascalho em sua composição, atendendo às limitações definidas pela operadora, é apontada como referencial técnico. A Tabela 07 apresenta os resultados obtidos com a pasta de cimento utilizando-se a batelada 130.

Se uma pasta de cimento avaliada, com cascalhos em sua composição, não atenda aos requisitos estabelecidos pela operadora, os demais testes laboratoriais que seriam realizados (consistometria, resistência compressiva, filtrado, etc.) com a mesma, são cancelados. Uma nova avaliação é realizada com a mesma composição de pasta de cimento, mas com um novo percentual de cascalhos em sua composição, visando o “enquadramento” da mesma em

relação às premissas técnicas determinadas pela operadora. Após a obtenção dos parâmetros reológicos esperados na pasta de cimento, realizavam-se as demais análises na seguinte ordem: filtrado, água livre, estabilidade, consistometria e resistência compressiva. Os dados reológicos obtidos nas pastas de cimento com 10% de cascalhos em sua composição são apresentados na Tabela 08.

Tabela 07 – Parâmetros reológicos da pasta de cimento avaliada.

RPM	Percentual de cascalho na pasta de cimento				
	0%	5%	10%	15%	20%
3	3	4	17,5	40,5	59,5
6	5	8	21,5	45	60
30	23	27,5	41	62	73,5
60	44	49	62,5	82,5	91
100	69,5	75,5	86	108	113,5
200	125	132	143,5	163,5	164
300	174	187	193	211	209
Géis inicial e final					
G _i	3,201	6,402	16,005	39,479	56,551
G _f	13,871	20,273	56,551	105,633	141,329
Outros parâmetros reológicos					
VP (cP)	171	172	173	177	180
LE (lb _f /100 pés ²)	8	11	20	50	63
n'	0,9098	0,8070	0,5648	0,3985	0,3211
k' (lb _f .s ⁿ /pés ²)	0,0067	0,0127	0,0273	0,1610	0,2553
Filtrado (mL /30 min)					
	84	96	102	151	181

Fonte: AUTOR, 2017.

Tabela 08 – Propriedades reológicas das pastas de cimento selecionadas, com 10% de cascalhos na composição.

Modelo Reológico	Parâmetro Reológico	Cimento - Batelada 127		Cimento - Batelada 129		Cimento - Batelada 130	
		Temperatura Ambiente - 80°F	Temperatura de Circulação de Fundo de Poço - 100°F	Temperatura Ambiente - 80°F	Temperatura de Circulação de Fundo de Poço - 100°F	Temperatura Ambiente - 80°F	Temperatura de Circulação de Fundo de Poço - 100°F
Bingham	VP (cP)	221	186	192	161	205	173
	LE (lb _f /100pés ²)	19	18	14	11	26	20
	n'	0,79	0,72	0,83	0,82	0,70	0,56
Potência	k' (lb _f .s ⁿ /pés ²)	0,023	0,018	0,013	0,010	0,054	0,027

Fonte: AUTOR, 2017.

Para o cálculo e verificação dos parâmetros reológicos adquiridos, apresentados na Tabela 08, adotou-se o procedimento laboratorial descrito em Campos (2005). Os parâmetros

anteriormente elencados são empregados para a determinação do regime de escoamento e previsão das pressões geradas durante as operações de cimentação.

Para cada pasta de cimento avaliada foram realizadas 14 leituras diretas (sendo 07 leituras ascendentes e 07 leituras descendentes, para cada velocidade) no reômetro rotativo, nas respectivas velocidades de 300, 200, 100, 60, 30, 6 e 3 rpm. A razão entre as leituras obtidas, numa mesma velocidade, permite a qualificação de determinadas propriedades da pasta analisada, como por exemplo:

- ✓ Quando a razão para todas as velocidades é aproximadamente igual a 1, isto indica que a pasta não apresenta sedimentação.
- ✓ Quando a maioria dos valores da razão é superior a 1, tal fato indica sedimentação da pasta na temperatura média de teste.
- ✓ Mais um indicativo de sedimentação da pasta se observa quando a diferença entre as leituras ascendentes e descendentes for superior a +5, numa mesma rotação, com coeficiente de mola igual a 1.
- ✓ As diferenças significativas nas leituras indicam que a pasta de cimento é instável, isto é, situa-se entre a sedimentação extrema e a gelificação excessiva. Neste caso, ajustes na composição da pasta são considerados.
- ✓ Quando a maioria dos valores da razão é inferior a 1, isto indica gelificação da pasta, na temperatura média de teste.

Os dados reológicos das pastas de cimento avaliadas nesta pesquisa apresentaram leituras que indicaram estabilidade das mesmas, assim como, revelaram propriedades reológicas independentes do tempo, na temperatura média dos testes. Tanto em relação à sedimentação, como em relação à gelificação.

Utilizou-se a média das leituras $[(\text{ascendente} + \text{descendente})/2]$, em cada rotação, para o cálculo dos parâmetros reológicos apresentados na Tabela 08, anteriormente apresentada.

5.1.7 Resistência compressiva

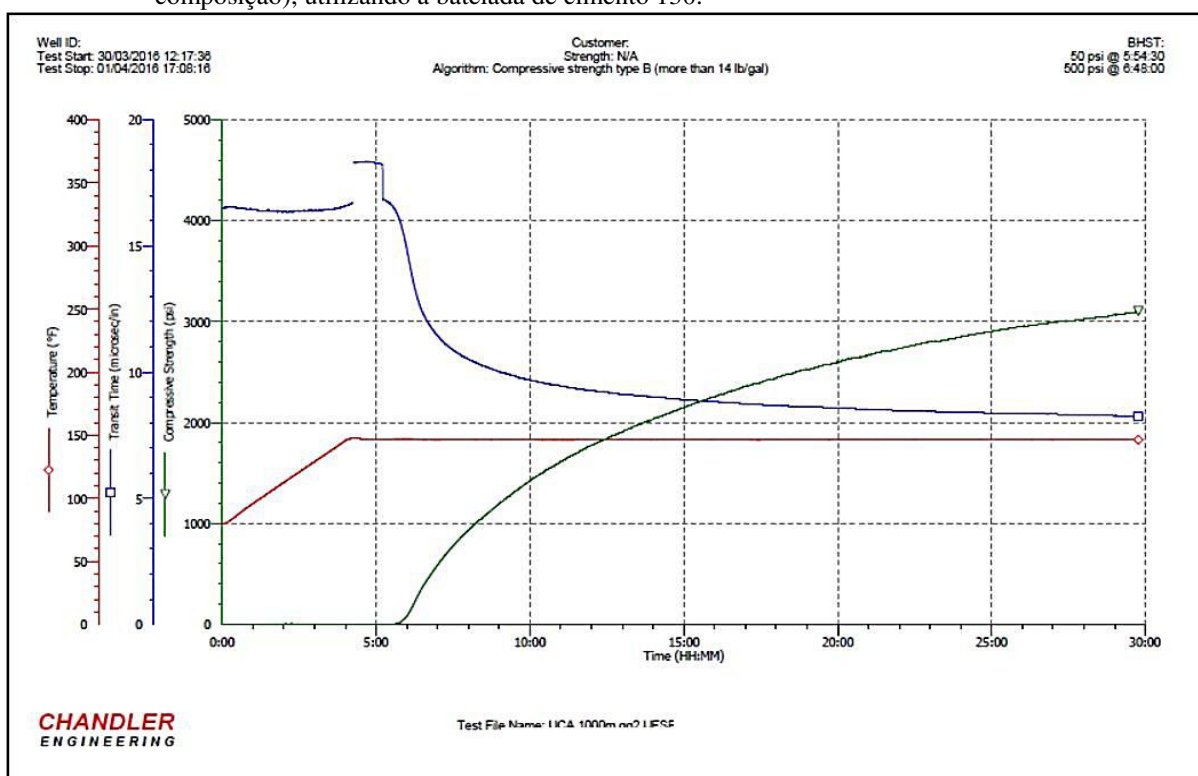
Para determinar o desenvolvimento da resistência à compressão das pastas de cimento analisadas, foi empregado o método ultrassônico (analisador de cimento ultrassônico).

A medida da resistência é correlacionada através de um algoritmo interno, com o período de tempo que a onda ultrassônica leva para atravessar uma amostra submetida à cura (tempo de trânsito). O método não é destrutivo e permite o acompanhamento contínuo do aumento da resistência à compressão.

O tempo de trânsito é continuamente monitorado. A resistência à compressão é calculada pelo equipamento, através das correlações do tempo de trânsito do processador.

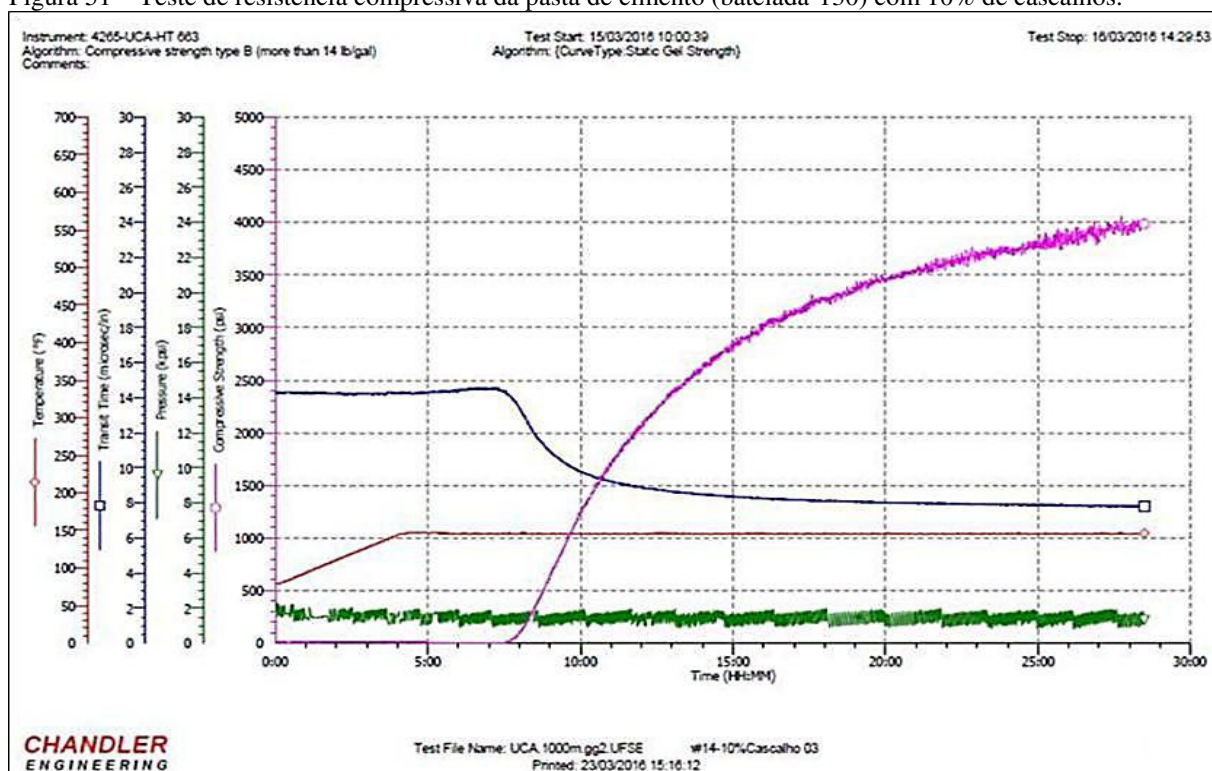
As pastas de cimento avaliadas atingiram 3000 psi em até 38 horas. O requisito técnico da operadora para este cenário é que se atinja 2500 psi em até 30h ou 3000 psi de resistência compressiva, em até 7 dias. Os valores obtidos são apresentados nas Figuras 50, 51, 52 e 53.

Figura 50 – Teste de resistência compressiva da pasta de cimento padrão (pasta sem cascalho em sua composição), utilizando a batelada de cimento 130.



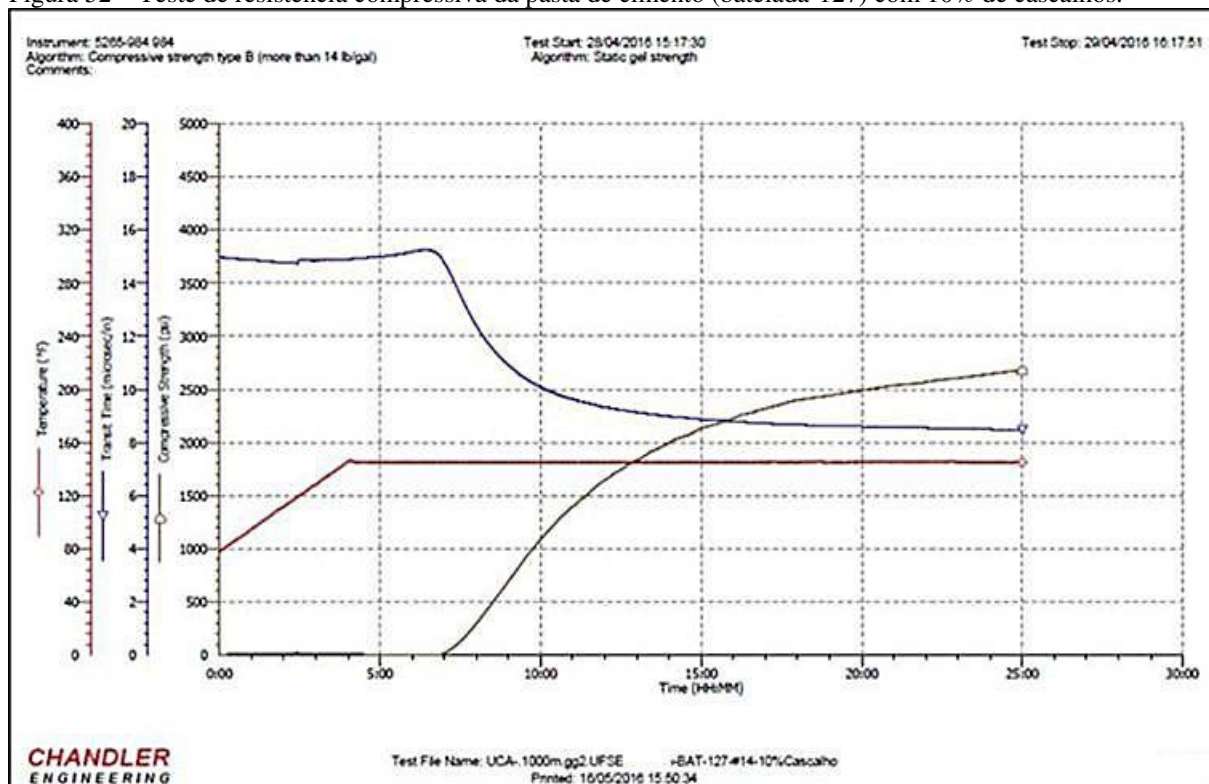
Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 51 – Teste de resistência compressiva da pasta de cimento (batelada-130) com 10% de cascalhos.



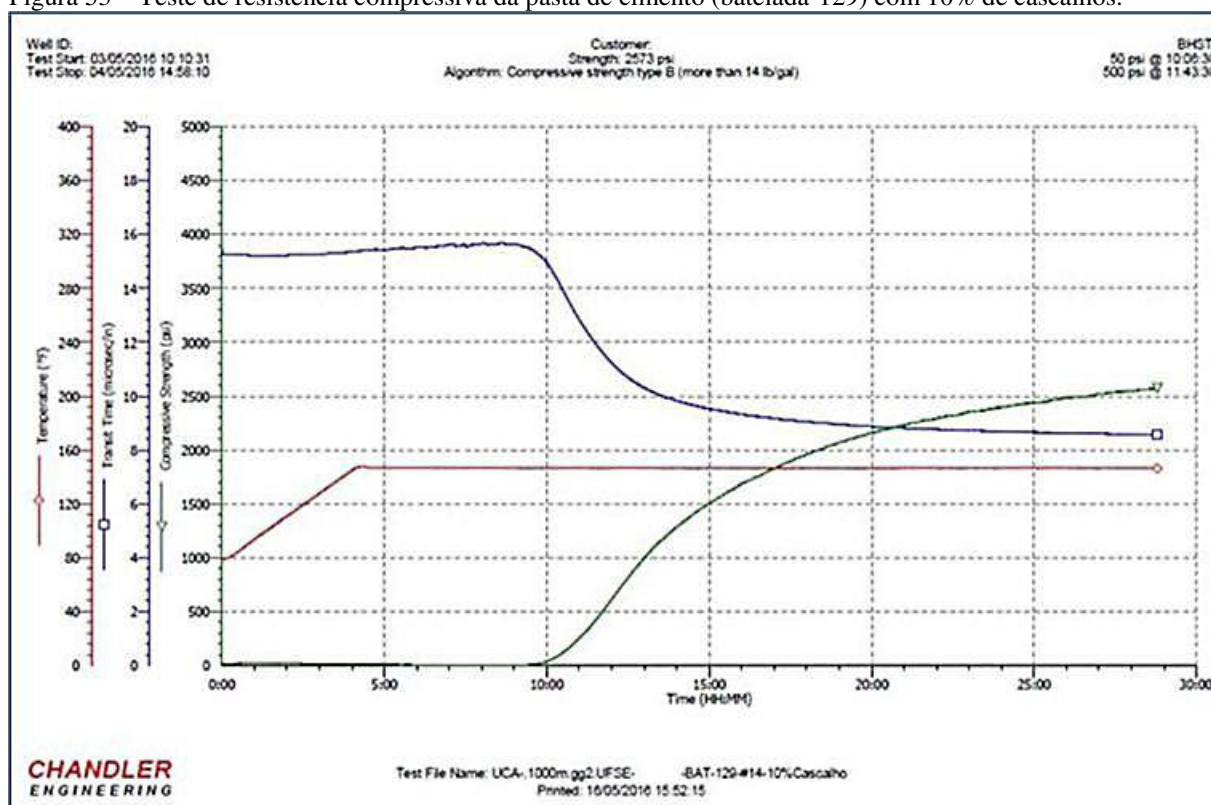
Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 52 – Teste de resistência compressiva da pasta de cimento (batelada-127) com 10% de cascalhos.



Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 53 – Teste de resistência compressiva da pasta de cimento (batelada-129) com 10% de cascalhos.



Fonte: AUTOR, 2017.

Os resultados dos testes de resistência compressiva das pastas de cimento avaliadas neste estudo estão de acordo com o enquadramento técnico estabelecido pela principal operadora do país, conforme apresentados na Tabela 09, a saber:

Tabela 09 – Testes de resistência compressiva das pastas avaliadas no LabCim/UFRN.

RESISTÊNCIA COMPRESSIVA		
Batelada	Percentual de cascalhos adicionados	Resistência compressiva da pasta de cimento adquirida em até 30h
130	0%	3100 psi
130	10%	4100 psi
127	10%	2900 psi
129	10%	2600 psi

Fonte: AUTOR, 2017.

5.1.8 Estabilidade

O objetivo deste teste é avaliar a segregação de sólidos quando a pasta de cimento for submetida às condições encontradas nas cimentações de poços de petróleo.

Se a diferença de massa específica ($\Delta\rho$) entre as seções (do fundo para o topo) do tubo decantador for $\geq 0,5$ lb/gal ou o rebaixamento do topo da pasta for > 5 mm, de acordo com Campos (2005), a pasta é dita instável e uma nova formulação de pasta deve ser desenvolvida.

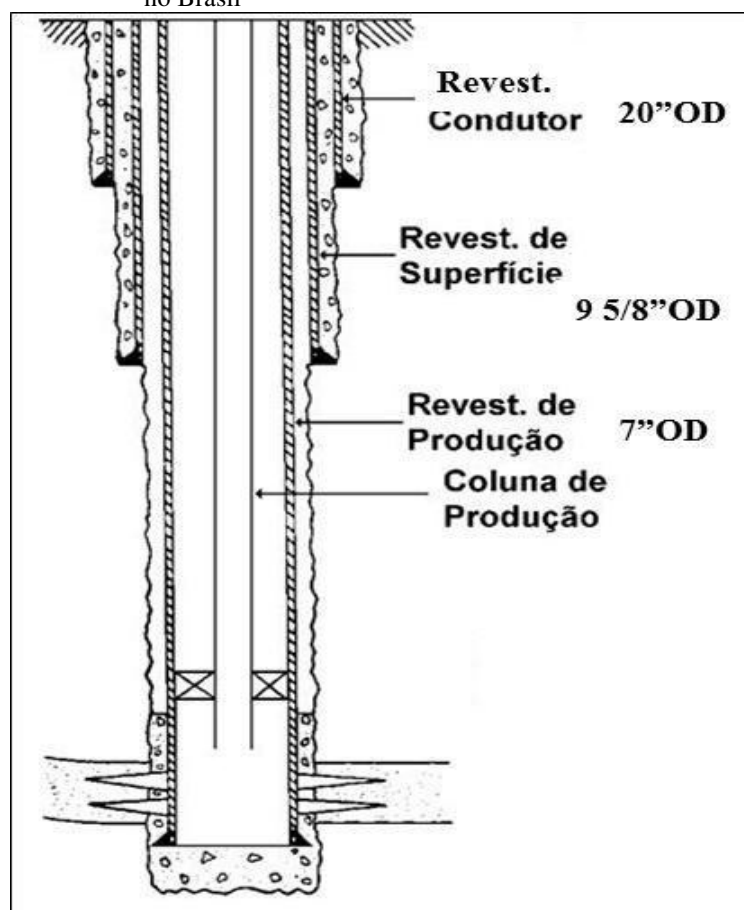
As pastas de cimento avaliadas na determinação da sedimentação com o uso do tubo decantador não apresentaram instabilidade, conforme os resultados obtidos e demonstrados na Tabela 10, nas três bateladas de cimento, com 10% de cascalhos em suas composições.

Tabela 10 – Estabilidade das pastas de cimento avaliadas, com 10% de cascalhos em suas composições.

Estabilidade	$\Delta\rho$ (lb _m /gal)	Rebaixamento (mm)
Batelada 127	-0,02	0
Batelada 129	0,06	0
Batelada 130	-0,05	0

Fonte: AUTOR, 2017.

Figura 54 – Configuração típica de revestimentos em poços terrestres no Brasil



Fonte: AUTOR, 2007.

5.2 Avaliação econômica

A produção média de cascalho de perfuração, considerando a geometria típica adotada (Figura 54) nos poços terrestres perfurados (tema deste estudo) no Brasil é de aproximadamente 5 m³ a cada 100 m de avanço de perfuração realizada (MI SWACO, 2009).

Uma análise sobre a viabilidade econômica do projeto é apresentada no Quadro 04, que contém as premissas básicas para o estudo de viabilidade econômica aplicadas no presente estudo:

Quadro 04 – Premissas adotadas no projeto.

DESCRIÇÃO	VALOR
Taxa mínima de atratividade (TMA).	15% a.a.
Vida útil do projeto.	04 anos
Valor residual.	-----
Alíquota de imposto de renda (IR).	10% a.a.
Nº de sondas terrestres, em Sergipe.	03
Nº de poços perfurados, por mês.	09
Nº de poços perfurados, por ano.	108
Massa de cascalho produzida, por poço, em tonelada (t).	100
Massa total de cascalho produzida, por ano, em tonelada (t).	10800
Massa consumida de cascalho beneficiado, em cimentação primária, por poço, em tonelada (t).	07
Custo do beneficiamento do cascalho, por tonelada.	R\$ 175,00
Custo do processo de licenciamento ambiental, por aterro controlado.	R\$ 172.816,56
Custo de aquisição de área, terraplenagem, impermeabilização e drenagem, por aterro controlado.	R\$ 157.558,88
Custo por abertura de aterro controlado.	R\$ 330.375,44
Quantidade de aterros controlados que não seriam abertos, devido à implantação do projeto.	01
Massa beneficiada de cascalho, por dia (t).	43
Massa total de cascalho beneficiada, por ano (t).	756
Massa beneficiada de cascalho, em 4 anos de projeto (t).	3024
As cotações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos foram obtidas através dos respectivos sítios eletrônicos.	
O acréscimo de custo praticado entre os preços FOB e os preços CIF para os equipamentos importados equivale a 100%. Com relação aos equipamentos nacionais os custos apresentados são FOB.	
Toda a massa de cascalho produzida é beneficiada. Uma parte desta massa de cascalho beneficiada (7%) é utilizada como matéria-prima na composição de pastas de cimento utilizadas nas cimentações primárias dos poços de petróleo.	
A taxa de câmbio adotada: US\$ 1.00 = R\$ 3,15.	
Os custos relativos ao processo de licenciamento ambiental e aos aterros controlados foram corrigidos pelo dólar (US\$).	

Fonte: AUTOR, 2017.

O Quadro 05 apresenta as despesas de capital necessárias à implantação do projeto.

Quadro 05 – Materiais permanentes e equipamentos.

Quadro 63 – Materiais permanentes e equipamentos.

MATERIAIS DE ESCRITÓRIO						
Nº	Descrição	Finalidade	Destinação	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor (R\$)
1	Computador	Aquisição de dados e serviços administrativos	Associação	2	2.000,00	4.000,00
2	Impressora	Impressão de relatórios e apoio aos serviços administrativos		1	1.000,00	1.000,00
3	Material permanente	Mesas, bancadas, cadeiras e armários		1	5.000,00	5.000,00
4	Estabilizador e/ou nobreak	Estabilização de rede para equipamentos		1	2.000,00	2.000,00
5	Ar condicionado	Refrigeração		1	5.000,00	5.000,00
6	Divisória	Adequação do espaço físico		1	5.000,00	5.000,00
Sub-Total 1						22.000,00
EQUIPAMENTOS PARA BENEFICIAMENTO						
Nº	Descrição	Finalidade	Destinação	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor (R\$)
1	Moinho de bolas ¹⁰	Cominuição de cascalhos secos, reduzindo o tamanho dos fragmentos de rocha	Associação	2	220.582,43	441.164,86
2	Peneira vibratória ¹¹	Normalizar o tamanho das partículas (fragmentos de rocha), possibilitando assim, a aplicação de cascalhos na composição da pasta de cimento		2	50.418,84	100.837,68
3	Esteira transportadora ¹²	Sistema destinado ao transporte de cascalhos, do moinho de bolas para a peneira vibratória, e retorno desta para o moinho de bolas.		2	12.604,71	25.209,42
4	Container caçamba	Armazenamento de cascalhos		2	60.000,00	120.000,00
5	Tanque	Armazenamento de fluido de perfuração recuperado		4	50.000,00	200.000,00
6	Secador rotativo	Secador vertical rotativo		2	70.000,00	140.000,00
7	Centrífuga	Centrífuga para a decantação de sólidos		2	60.000,00	120.000,00
Sub-Total 2						1.147.211,96
VALOR TOTAL						1.169.211,96

Fonte: AUTOR, 2007.

O Quadro 06 apresenta as despesas correntes relativas aos gastos com obras e instalações, por ano.

¹⁰ Cotação moinho de bolas: <http://www.olx.com.br/vi/306302138.htm>

¹¹ Cotação peneira vibratória: <http://tianruimachinery-com.buy.peerflix.com/pz691884a-linear-motion-drilling-slurry-shale-shaker-mesh-mud-solid-pitless.html>

¹² Cotação esteira transportadora: <http://www.peerflix.com/pz5036bb5-cz59e86bb-td75-multipurpose-fixed-belt-conveyor.html>

Quadro 06 – Obras e instalações.

Quadro 05 – Obras e Instalações.						
Nº	Descrição	Finalidade	Destinação	Período (mês)	Valor Unitário (R\$)	Valor (R\$)
1	Locação	Aluguel de galpão industrial com espaço adequado à montagem, operação e gerenciamento	Associação	12	5.000,00	60.000,00
2	Manutenção	Manutenção das instalações			2.000,00	24.000,00
VALOR TOTAL ANUALIZADO – OBRAS E INSTALAÇÕES						84.000,00

Fonte: AUTOR, 2007.

O Quadro 07 apresenta a despesa corrente anual relativa ao custo do serviço terceirizado.

Quadro 07 – Serviço terceirizado.

Nº	Descrição	Finalidade	Destinação	Período (mês)	Valor Unitário (R\$)	Valor (R\$)
1	Contador	Serviço contábil	Associação	13	2.000,00	26.000,00
VALOR TOTAL ANUALIZADO – SERVIÇOS TERCEIRIZADOS						26.000,00

Fonte: AUTOR, 2017.

No Quadro 08 são elencadas as despesas correntes relativas aos gastos com pessoal capacitado, no período de 01 ano.

Quadro 08 – Despesas correntes anuais com pessoal.

Quadro 06 – Despesas correntes anuais com pessoal.							
Nº	Descrição	Finalidade	Destinação	Período (mês)	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor (R\$)
1	Técnico	Acompanhamento da montagem e operacionalização dos equipamentos	Associação	12	8	21.000,00	168.000,00
2	Gestor	Acompanhamento da montagem e operacionalização dos equipamentos			2	42.000,00	84.000,00
3	Encargo trabalhista	INSS, FGTS, etc.			1	252.000,00	252.000,00
VALOR TOTAL ANUALIZADO – PESSOAL							504.000,00

Fonte: AUTOR, 2017

No Quadro 09 apresentam-se as despesas correntes anuais relativas ao transporte.

Quadro 09 – Despesas correntes anuais com transporte.

Quadro 09 – Despesas correntes anuais com transporte.						
Nº	Descrição	Finalidade	Destinação	Período (mês)	Valor Unitário (R\$)	Valor (R\$)
1	Locação de veículos	Administração	Associação	12	4.000,00	48.000,00
2		Operacional			20.000,00	240.000,00
VALOR TOTAL ANUALIZADO – TRANSPORTE						288.000,00

Fonte: AUTOR, 2017.

O Quadro 10 apresenta a despesa corrente anual relativa ao material de consumo.

Quadro 10 – Despesas correntes anuais com materiais de consumo.

Nº	Descrição	Finalidade	Destinação	Período (mês)	Valor Unitário (R\$)	Valor (R\$)
1	Material de limpeza	Produto de limpeza	Associação	12	2.000,00	24.000,00
2	Material de escritório	Papéis, tinta para impressão, etc.			2.000,00	24.000,00
VALOR TOTAL ANUALIZADO – MATERIAL DE CONSUMO						48.000,00

Fonte: AUTOR, 2017.

Visto que a periodicidade habitual dos contratos celebrados entre as empresas prestadoras de serviços, em exploração e produção de petróleo, e as operadoras que atuam no Brasil, situa-se entre 2 e 4 anos, apresenta-se inicialmente (Tabela 11) uma avaliação econômica sobre a implantação de um projeto de beneficiamento de cascalhos realizado por uma associação de caráter social, considerando o tempo de atividade contratual do projeto como sendo de 4 anos e os valores referentes às despesas de capital e correntes apresentados nos Quadros 05, 06, 07, 08, 09 e 10.

A metodologia empregada nas avaliações econômicas deste estudo considera o valor temporal do investimento a ser realizado. Os indicadores de desempenho do projeto utilizados foram: Payback Simples, Payback Descontado, Taxa Interna de Retorno (TIR), Índice de Lucratividade e Valor Presente Líquido (VPL). Os três primeiros são indicadores associados ao risco do projeto. Os dois últimos são indicadores associados à lucratividade e à rentabilidade do projeto, respectivamente. O investimento inicial do projeto mencionado na Tabela 11 é o valor total fornecido no Quadro 05. O método de depreciação linear foi aplicado para os equipamentos. A receita anual é resultante do beneficiamento da massa total de cascalho produzida por ano (Quadro 05), a um valor de R\$ 175,00 por tonelada de cascalhos beneficiados. As despesas elencadas são derivadas das despesas correntes anuais (pessoal, materiais de consumo, obras e instalações, transporte e serviço terceirizado).

Uma das premissas adotadas na análise econômica efetuada é a realização de uma receita bruta mínima mensal de R\$ 157.500,00, durante a vigência do contrato, paga pela operadora à associação, oriunda do beneficiamento de 900 t/mês de cascalhos. Tal premissa visa viabilizar o investimento necessário à implantação e operacionalização do projeto, pela associação.

O lucro tributável (LT) é o valor obtido pela diferença entre a receita bruta e a despesa corrente, menos a depreciação dos equipamentos, a cada ano. O imposto de renda aplicado foi de 10% sobre o LT anual obtido. O fluxo de caixa (FC) foi calculado como sendo a diferença entre o lucro tributável e o imposto de renda.

O índice de lucratividade (IL), assim como a TIR e o VPL, é um método baseado nos fluxos de caixa descontados. Conforme apresentado na Tabela 11, o IL é 2,14 vezes o valor do investimento inicial do projeto.

O valor presente líquido (VPL), que determina o valor presente de receitas futuras descontadas a uma taxa mínima de rentabilidade, menos o investimento inicial, apresenta um valor atrativo e superior ao investimento inicial.

A taxa interna de retorno (TIR), definida como sendo a taxa de desconto que zera o valor presente líquido dos fluxos de caixa (FC) do projeto, encontra-se acima da taxa mínima de atratividade.

Em síntese, como se pode observar, todos os indicadores de desempenho do projeto demonstram a viabilidade econômica deste, mesmo tendo adotado nesta avaliação uma taxa mínima de rentabilidade bastante conservadora (15% a.a.), também chamada de taxa mínima de atratividade (TMA), que representa o custo de oportunidade do capital investido.

Tabela 11 – Avaliação econômica da associação, em 04 anos.

Período - Anual	Investimento R\$	Depreciação R\$	Receita R\$	Despesa R\$	LT R\$	IR R\$	Fluxo de Caixa R\$	VPr R\$
0	- 1.169.211,96						- 1.169.211,96	- 1.169.211,96
1		292.302,99	1.890.000,00	950.000,00	647.697,01	64.769,70	875.230,30	761.069,83
2		292.302,99	1.890.000,00	950.000,00	647.697,01	64.769,70	875.230,30	661.799,85
3		292.302,99	1.890.000,00	950.000,00	647.697,01	64.769,70	875.230,30	575.478,13
4		292.302,99	1.890.000,00	950.000,00	647.697,01	64.769,70	875.230,30	500.415,76
Valor Presente Líquido (VPL)								1.329.551,61
PERÍODO		1	2	3	4			
Investimento	FC0	FC1	FC2	FC3	FC4			
- 1.169.211,96		875.230,30	875.230,30	875.230,30	875.230,30			
Payback Simples		- 293.981,66	581.248,64	1.456.478,94	2.331.709,24			
VPr	2.498.763,57	761.069,83	661.799,85	575.478,13	500.415,76			
Payback Descontado		- 408.142,13	253.657,71	829.135,84	1.329.551,61			
Payback Simples	1 ano, 4 meses e 1 dia							
Payback Descontado	1 ano, 5 meses e 18 dias							
Índice de Lucratividade	2,14							
VPL	R\$1.329.551,61							
TIR	64,68%							
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	15%	a.a.						
Investimento	FC0	FC1	FC2	FC3	FC4			
Vida Útil do Projeto	4	ano(s)						
Valor Residual	0							
Alíquota de Imposto de Renda	10%	a.a.						

Fonte: AUTOR, 2017.

Uma nova avaliação econômica foi efetuada, considerando desta vez como tempo de atividade contratual do projeto, 2,25 anos, uma vez que, para fins comparativos, os dados adquiridos se referem a um período de contratação dos serviços por 27 meses.

Os dados apresentados no Quadro 11, relativos à empresa contratada, foram obtidos através de CAVALCANTE (2011) e da página de Transparência Pública do sítio eletrônico da PETROBRAS S.A./Contratos de Serviços. O valor estabelecido em contrato celebrado entre o prestador de serviço e a operadora considera a distância média percorrida entre os pontos de coleta e descarte de cascalhos.

Quadro 11 – Comparativo de uma associação versus uma empresa prestadora de serviço.

OBJETO DO CONTRATO	SERVIÇOS TÉCNICOS DE SECAGEM DE CASCALHO E LOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS		
DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	ASSOCIAÇÃO	EMPRESA CONTRATADA ¹³
Valor total do contrato para a operadora	1	R\$ 4.252.500,00	R\$ 26.648.261,19
Período de contratação	-	2,25 anos	2,25 anos
Contratação de pessoal	-	10 pessoas	4 pessoas
Custo do beneficiamento do cascalho, por tonelada	1	R\$ 175,00	R\$ 350,00
Custo do beneficiamento do cascalho, em 2,25 anos	24300	R\$ 4.252.500,00	R\$ 8.505.000,00
Custo mínimo mensal da operadora para o beneficiamento do cascalho	900	R\$ 157.500,00	-
Locação de Equipamentos	1	-	R\$ 18.143.261,19

Fonte: AUTOR, 2017.

Na Tabela 12, apresenta-se a avaliação econômica da associação (projeto social), para 2,25 anos, demonstrando a viabilidade econômica do projeto, no cenário comparativo apresentado no Quadro 11.

¹³ Informações obtidas através do link <https://conteudo.imguol.com.br/blogs/52/files/2015/11/Petrobras-contratos.pdf>

Tabela 12 – Avaliação econômica da associação, em 2,25 anos.

Período - Anual	Investimento R\$	Depreciação R\$	Receita R\$	Despesa R\$	LT R\$	IR R\$	Fluxo de Caixa R\$	VP R\$
0	- 1.169.211,96						- 1.169.211,96	- 1.169.211,96
1		519.649,76	1.890.000,00	950.000,00	420.350,24	42.035,02	897.964,98	780.839,11
2		519.649,76	1.890.000,00	950.000,00	420.350,24	42.035,02	897.964,98	678.990,53
3 (3 meses)		129.912,44	472.500,00	237.500,00	105.087,56	10.508,76	224.491,24	163.918,99
Valor Presente Líquido (VPL)								454.536,67
PERÍODO		1	2	3 (3 meses)				
Investimento	FC0	FC1	FC2	FC3				
-R\$ 1.169.211,96		897.964,98	897.964,98	224.491,24				
Payback Simples		- 271.246,98	626.717,99	851.209,24				
VP	R\$ 1.623.748,63	780.839,11	678.990,53	163.918,99				
Payback Descontado		- 388.372,85	290.617,68	454.536,67				
Payback Simples	1 ano, 3 meses e 19 dias							
Payback Descontado	1 ano, 5 meses e 6 dias							
Índice de Lucratividade	1,39							

Continua

Continuação

Investimento	FC0	FC1	FC2	FC3				
VPL	R\$ 454.536,67							
TIR	34,08%							
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	15%	a.a.						
Vida Útil do Projeto	2,25	ano(s)						
Valor Residual	0							
Alíquota de Imposto de Renda	10%	a.a.						

 Fonte: AUTOR, 2017.

Além da viabilidade econômica demonstrada, faz-se necessário mencionar que o envio de uma quantidade menor de cascalho para aterros industriais controlados, como exemplo de destinação final do mesmo, implica na redução da quantidade de aterros industriais, proporcionando, dessa forma, a redução no custo de implantação de novos aterros, contemplando aquisição de área, terraplenagem, impermeabilização e drenagem, além do custo do processo de licenciamento ambiental (Tabela 13) que, em qualquer das suas etapas, é inteiramente custeado pelo empreendedor (Lei nº 6.938/81//CONAMA nº 001/86 e nº 237/97). A Lei Complementar nº 140/2011 discorre sobre as competências estadual e federal para o licenciamento, levando em consideração a localização do empreendimento.

Tabela 13 – Licença ambiental ou renovação (Portaria interministerial No 812, de 29 de setembro de 2015).

EMPRESA DE PEQUENO PORTE			
Impacto Ambiental	Pequeno	Médio	Grande
Licença Prévia	R\$ 5.426,84	R\$ 10.853,69	R\$ 21.707,37
Licença de Instalação	R\$ 15.195,16	R\$ 30.390,32	R\$ 60.780,64
Licença de Operação	R\$ 7.597,58	R\$ 15.195,16	R\$ 30.390,32
EMPRESA DE MÉDIO PORTE			
Impacto Ambiental	Pequeno	Médio	Grande
Licença Prévia	R\$ 7.597,58	R\$ 15.195,16	R\$ 30.390,32
Licença de Instalação	R\$ 21.164,69	R\$ 42.329,38	R\$ 84.658,75
Licença de Operação	R\$ 9.768,32	R\$ 21.164,69	R\$ 42.329,38
EMPRESA DE GRANDE PORTE			
Impacto Ambiental	Pequeno	Médio	Grande
Licença Prévia	R\$ 10.853,69	R\$ 21.707,37	R\$ 43.414,75
Licença de Instalação	R\$ 30.390,32	R\$ 60.780,64	R\$ 121.561,29
Licença de Operação	R\$ 15.195,16	R\$ 30.390,32	R\$ 60.780,64

Fonte: IBAMA, 2015.

5.3 Gestão ambiental

O presente estudo permite uma gestão (do cascalho gerado por poço) com maior integração entre os objetivos da indústria, legislação ambiental brasileira vigente e os interesses comuns da sociedade. O seu gerenciamento deve ser baseado na realidade local (estrutura administrativa, funcionamento, recursos financeiros e legislação pertinente), contemplando os aspectos técnicos, as quantidades e tipologia destes resíduos.

Procura-se estabelecer práticas “responsáveis” nos processos regulares adotados continuamente pela indústria do petróleo, que promovam um efetivo desenvolvimento sustentável. Para que isto ocorra, deve-se ver o mundo de forma holística, do todo para os componentes, analisando os fatores ambientais, sociais e econômicos. Só uma visão integrada proporcionará a busca eficaz de uma sociedade sustentável. Desta forma, devemos identificar as demandas sociais sob três pilares: crescimento econômico, desenvolvimento social e proteção ambiental. Estas devem ser entendidas concomitantemente, para que se atinja um ponto de equilíbrio harmônico entre a natureza e o homem.

5.4 Responsabilidade social

A indústria do petróleo não pode ser vista de forma dissociada do meio ambiente. A viabilidade de qualquer projeto de energia passa por uma rigorosa avaliação de seus impactos ambientais. Nesta indústria, por vezes, os desafios ambientais tornam-se questões jurídicas e o direito ambiental apostado, acaba sendo visto como um entrave para o desenvolvimento regional.

O direito ambiental na indústria do petróleo deve ser visto como sendo a gênese do desenvolvimento sustentável, considerado pelo Supremo Tribunal Federal como fundamental predecessor de projetos e “fator de obtenção do justo equilíbrio entre as exigências da economia e da ecologia” (MELLO, 2006). Apenas dessa forma será possível resolver dilemas de segurança jurídica, enfrentados hoje por todos os agentes da indústria petrolífera.

Na atualidade, os aspectos ambientais são introduzidos na formulação de políticas públicas, e o desenvolvimento só é considerado perfeito, se este for sustentável.

O Brasil possui recursos naturais extensos que devem ser cuidadosamente explorados. A demanda por desenvolvimento socioeconômico é tarefa difícil num país cuja grande parte da população requer condições mínimas de sobrevivência. Falar de preservação ambiental necessita repensar o modelo de desenvolvimento a ser adotado e a distribuição desigual de renda existente no país. No entanto, o grau de dificuldade do desafio não deve representar uma justificativa para a falta de preocupação com o tema.

As instituições, ao procurarem adotar sustentabilidade ambiental em seus projetos, podem corrigir práticas já estabelecidas, identificando fontes de desperdícios, como também de oportunidades para melhorias, buscando reduzir os seus custos. A utilização racional dos recursos naturais responde satisfatoriamente à busca pela qualidade ambiental, à evolução da qualidade de vida, como também, na redução significativa de despesa.

A proteção da biodiversidade é uma matéria não mensurada pelos cálculos econômicos, mas que representa a garantia da saúde do homem, assim como, o bom desempenho do ser humano no cumprimento de suas tarefas.

As análises realizadas neste estudo buscam fomentar o desenvolvimento sustentável efetivo nas regiões produtoras de petróleo por meio da valorização do saber local, da garantia de geração de renda sustentável e da preservação dos ativos ambientais.

O Quadro 12 indica as ações que devem ser implantadas para a execução do projeto no âmbito da Universidade. Para a implantação e acompanhamento do projeto deve ser criado um “Comitê de Gestão Ambiental”, coordenado pelo PRODEMA e composto por docentes do

NUPETRO e por representantes de associações regionais localizadas nas regiões petrolíferas do estado.

Quadro 12 – Ações de sustentabilidade para a implantação do projeto de beneficiamento do cascalho.

Ação de sustentabilidade do projeto a ser implantado	Classificação da ação	Justificativa
Obtenção de contratos para a prestação de serviços com operadoras	Cumprimentos legais das questões ambientais	Segurança jurídica
Obtenção de contratos para o financiamento de recursos com instituições de fomento	Captação de recursos financeiros	Investimento inicial
Locação de uma sede apropriada para o desenvolvimento do projeto	Instalações	Despesa operacional
Aquisição de um moinho de bolas	Investimento em bens de capital	Equipamentos necessários ao beneficiamento do cascalho
Aquisição de um secador de vórtice rotativo		
Aquisição de uma peneira vibratória, com malhas de 20, 100 e 200 mesh		
Aquisição de uma esteira transportadora de cascalho		
Aquisição de equipamentos auxiliares como a balança, a estufa, duas provetas graduadas (1000 mL cada), densímetro graduado de bulbo simétrico, termômetro e cronômetro		
Treinamento	Educação continuada	Qualificação da mão de obra
Criação de um comitê responsável pelo apoio ao planejamento, implantação e acompanhamento do beneficiamento do cascalho	Gestão sustentável	Desenvolvimento de práticas que valorizem a participação do indivíduo e da comunidade nas ações do projeto

Fonte: AUTOR, 2017.

O estudo ora exposto corrobora a viabilidade técnica e econômica do projeto, permitindo desta forma, que a sociedade civil, através de associações, e com o apoio de instituições de fomento, possa implantá-lo, possibilitando assim, o desenvolvimento sustentável regional. Este projeto apresenta meios de conciliar o desenvolvimento socioeconômico com a conservação e proteção do ecossistema.

O meio ambiente e a sustentabilidade não devem ser vistos apenas como custos para a atividade industrial. As empresas que tiverem uma posição de vanguarda no mercado e se organizarem para as décadas vindouras de economia verde, estarão em situação privilegiada.

5.5 Condições dos poços avaliados

Todos os poços foram perfurados, na fase de 8 ½”, com brocas PDC, até a profundidade final dos mesmos, atingindo o membro e a formação previstos no projeto de perfuração dos poços. Em termos de litoestratigrafia, a formação Muribeca é formada por três membros: o membro Carmópolis, na base; o membro Ibura, na porção intermediária, e o membro Oiteirinhos, no topo. A espessura máxima dessa formação é de 1150 m na sub-bacia

de Sergipe e 1250 m na sub-bacia de Alagoas. A formação Muribeca é composta por siliciclásticos grossos do membro Carmópolis, evaporitos, carbonatos e folhelhos do membro Ibura e folhelhos e calcilutitos do membro Oiteirinhos. O membro Oiteirinhos é composto de alternâncias de folhelhos betuminosos, calcilutitos ricos em pelóides e algas, siltitos, arenitos finos e delgadas intercalações de anidritas, interpretados como depósitos lagunares a plataformais. Este membro caracteriza-se por calcilutito maciço a laminado, folhelho e silito castanho.

5.6 Propriedades físicas da pasta de cimento requeridas

As pastas de cimento empregadas nas operações de cimentação primária dos poços petrolíferos são preparadas conforme a característica específica de cada poço. As propriedades físicas requeridas para cada formulação de pasta dependem das condições de temperatura e pressão do poço a ser cimentado. Neste estudo, conforme já informado, a profundidade vertical avaliada foi de 1000 m, considerando um gradiente geotérmico de 2 °F/100 pés. Portanto, adotando uma temperatura estática (de fundo de poço) de 146 °F (~ 63 °C) e 100 °F (~ 38 °C). A massa específica das pastas de cimento avaliadas foi de 15,6 lb/gal, devido ser este o valor atualmente utilizado pelas operadoras para pastas de produção, nos poços terrestres do Nordeste brasileiro.

6 CONCLUSÕES

A proposta ora apresentada tem como objetivo promover uma maior distribuição de renda e um maior esforço do Poder Público em apoiar as iniciativas de organizações populares, como as associações, visando a autodeterminação e sustentabilidade econômica das mesmas, pautadas em programas de desenvolvimento local, economia solidária, cooperativismo, associativismo e democratização do conhecimento técnico, científico e cultural.

Os resultados alcançados neste estudo demonstram ser este um projeto factível, uma vez que a incorporação de cascalho de perfuração na pasta de cimento apresenta-se como uma alternativa socialmente justa, pois contribui com o desenvolvimento social das comunidades, através da possibilidade de gerar emprego e renda, em regiões carentes onde há atuação das operadoras de petróleo, promovendo uma maior integração entre a sociedade e a cadeia produtiva da indústria, atuando como um propulsor de processos de desenvolvimento, de fortalecimento da cidadania, a serviço da sociedade.

O presente estudo auxilia as operadoras no monitoramento dos seus respectivos desempenhos, ao longo do tempo. Assim como, favorece a prática do “benchmarking” e possibilita uma aplicação mais nobre a um dos resíduos gerados na perfuração de poços de petróleo.

A implantação do projeto derivado desta pesquisa, no qual se adiciona 10% de cascalhos em pastas de cimento de produção, representa uma vantagem econômica para a indústria, conforme demonstrado neste estudo, visto que o tratamento dos cascalhos resultantes da perfuração de poços apresenta uma melhor relação custo/benefício em comparação com o tratamento convencional dos cascalhos. Possibilita tecnicamente ainda, um aumento de 8% no rendimento da pasta de cimento de produção diminuindo, portanto, o volume de cimento e de aditivos de pasta utilizados na cimentação primária. Como consequência direta desta redução, há uma diminuição no custo específico da pasta de cimento. Contribui desta forma, com a atenuação do custo da logística empregada no transporte e descarte destes resíduos. Como também, possibilita a redução dos cascalhos dispostos em aterros e, conseqüentemente, a diminuição do passivo ambiental gerado, por esta atividade industrial.

Quanto maior o diâmetro médio dos cascalhos adicionados ao cimento seco, maior será o tempo de espessamento em relação a esta mesma pasta de cimento, sem a adição de

cascalhos em sua composição. Portanto, faz-se necessária a aplicação do processo de moagem no beneficiamento dos cascalhos, a fim de possibilitar a manutenção das propriedades físico-químicas requeridas pelas operadoras, para as pastas de cimento.

A solidificação dos cascalhos através da adição de cimento Portland e outros produtos inorgânicos é, particularmente, eficiente para resíduos desta natureza, pois, o pH da matriz de cimento possibilita a transformação de cátions em hidróxidos e carbonatos insolúveis, assim como muitos íons metálicos podem ser incorporados à estrutura cristalina da matriz de cimento.

A estabilização e solidificação de cascalhos gerados pela perfuração de poços de petróleo apresentam-se como técnicas viáveis para o reaproveitamento de resíduos oleosos, a partir da utilização do cimento como agente estabilizante. Assim, o reaproveitamento desses resíduos visa fortalecer a prática do desenvolvimento sustentável.

Na gestão dos resíduos sólidos, a sustentabilidade ambiental e social se constrói a partir de modelos e sistemas integrados, que possibilitem tanto a redução de um passivo ambiental, como a reutilização dos resíduos gerados para que estes possam servir de matéria prima para a indústria, promovendo redução de custos, contribuindo com o meio ambiente e gerando emprego e renda.

Como sugestão para estudos futuros sobre o assunto, propõe-se a avaliação de pastas de cimento com cascalhos em sua composição, destinadas a poços de alta pressão e alta temperatura, usualmente denominados de poços HPHT.

O desempenho do projeto em destaque poderá ser acompanhado a partir de relatórios mensais fornecidos pelas operadoras, contendo informações técnicas de perfis sônicos, como o perfil de massa (ou aderência) do cimento, denominado de CBL (*Cement Bond Log*) e o perfil de densidade variável, designado de VDL (*Variable Density Log*), que avaliam a qualidade da cimentação primária realizada nos poços de petróleo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos adicionais podem ampliar a aplicação destas pastas de cimento com cascalhos em sua composição, observando com mais profundidade, os efeitos da granulometria dos cascalhos misturados ao cimento seco, visando atender os requisitos estabelecidos para a cimentação secundária (squeeze, recimentações e tampões), por exemplo.

A redução, a reciclagem e a recuperação são as chaves para um processo eficiente de gestão de resíduos. E, para que haja eficiência na gestão de resíduos, especificamente, os cascalhos resultantes da perfuração de um poço de petróleo, faz-se necessária a adoção de medidas como: o planejamento, o conhecimento sobre a quantidade e os tipos de cascalhos gerados, o monitoramento, a contenção, o transporte, o manuseio e a logística para a realização do tratamento dos cascalhos, bem como para o descarte dos mesmos.

O aproveitamento de parte dos resíduos gerados pela própria indústria do petróleo, além do controle do descarte dos resíduos gerados, passando pela qualificação de todos os envolvidos no processo de aproveitamento destes cascalhos, demonstrará que, além de uma liderança que entende a importância da gestão ambiental como uma questão estratégica, a operadora difundirá a consciência ambiental, entre os seus funcionários, colaboradores, acionistas e gestores públicos. A melhoria contínua e um trabalho de reforço dessa cultura garantem a continuidade característica.

Uma das formas de indução positiva na área ambiental é o incentivo fiscal que motiva as pessoas físicas e jurídicas a praticarem atividades de menor impacto ambiental, estimulando condutas não poluidoras. Ainda no campo da indução positiva, existem os incentivos creditícios e financeiros.

Estes incentivos são ferramentas importantes para o Poder Público atingir o objetivo pretendido que é de coibir ações poluidoras, seja por parte da sociedade civil, empresas públicas ou privadas. Tais incentivos devem ser proporcionais aos benefícios sociais concedidos. Uma maior integração das políticas públicas de municípios, estados e da união, na gestão destes resíduos, certamente contribuirá para alcançar uma gestão integrada e ambientalmente adequada dos resíduos sólidos para as empresas que empregam os indicadores ambientais sistematicamente.

De acordo com o Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/CB-38), várias empresas, no Brasil, utilizam indicadores ambientais de forma sistematizada, como a norma ISO 14031, para avaliação do seu desempenho

ambiental. As empresas que usam indicadores ambientais, normalmente são empresas multinacionais ou são empresas estatais.

O Governo Federal, através da Agência Nacional de Petróleo (ANP), poderá promover a implantação de projetos de responsabilidade socioambiental, para todas as empresas operadoras (nacionais e multinacionais) que atuam no País, buscando alinhar os processos da indústria as demandas e valores da sociedade, do meio ambiente, do governo, e do mercado.

8 REFERÊNCIAS

- ABBE, O. E. et al. Novel sintered glass-ceramics from vitrified oil well drill cuttings. *Journal Material Science*. v 44. p. 4296–4302, 2009.
- ABNT NBR 6502, Rochas e Solos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995.
- ABNT NBR 9831, Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos — Requisitos e métodos de ensaio, 2008.
- AL BAKRI, M. M., MOHAMMED, H., KAMARUDIN, H., KHAIRUL NIZA, I., ZARINA, Y., Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement, *Journal of Engineering and Technology Research* Vol. 3(1), pp. 1-4, January 2011.
- AL-TABBAA, A., STEGEMANN J. A., Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, Taylor & Francis Group, London, ISBN 041537460-X, 2005.
- ANP, Bacia Sergipe-Alagoas, Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2012.
- API RP10B-2; ISO 10426-2, Recommended practice for testing well cements, 23rd Edition, April 2002.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers, Drilling fluids processing handbook, ISBN 0-7506-7775-9, Elsevier, 2005.
- ATASHNEZHAD A., CORYELL, T., HARELAND, G., Barite Nanoparticles Reduce the Cement Fluid Loss, Oklahoma State University, Society of Petroleum Engineers, SPE-185114-MS, 2017.
- CAMPOS, G.; SIMÃO, C. A.; TEIXEIRA, K. D., Curso básico sobre cimentação primária. PETROBRAS, 2002.
- CAMPOS, G., VELLASCO, R. C., PROCELAB - Procedimentos e métodos de laboratório destinados à cimentação de poços petrolíferos, PETROBRAS/E&P/ENGP, 2005.
- CAVALCANTE, E. H., MOTTA, L. M. G., UBALDO, M. O., NASCIMENTO, L. A. H., VEIGA, I. L., COSTA, J. H., Construção de trecho monitorado com utilização do resíduo cascalho de perfuração, XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, IBP, 2011.
- CHEN, T.; KUNG U, N. C.; LIN, S. An Innovative Utilization of Drilling Wastes as Building Materials. SPE Publication 106913. SPE E&P Environmental and Safety Conference held in Galvesion, Texas. U. S. A., 5-7 March, 2007.
- COSTA, G. S., Extração de espécies metálicas de resíduo sólido proveniente da pirólise de borra de petróleo, Universidade Federal do Paraná, 2010.
- CRUZ, L. R., Caracterização Tectono-Estratigráfica da Sequência Transicional na Sub-bacia de Sergipe, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- CUNHA, B. P., AUGUSTIN, S., LIMA, L. G. D., COSTA, N. B. A., Os saberes ambientais, sustentabilidade e olhar jurídico: visitando a obra de Enrique Leff, 2015. Em LEFF, apud CUNHA, 2015.
- GOOGLE, Política dos 3 R's; Disponível em: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/politica-dos-3rs.htm>, 2017.

GOOGLE, Drilling Waste Management Information System Website; Disponível em: <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/>, 2017.

DYKE, K. V., Drilling Fluids, First Edition, ISBN-13: 978-0886981891, 2000.

EPA, Development Document for Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for Synthetic-Based Drilling Fluids and other Non-Aqueous Drilling Fluids in the Oil and Gas Extraction Point Source Category, EPA-821-B-00-013, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2000.

FIALHO, P. F., Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo do potencial de aplicação em concreto, Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

FREITAS, F. C., Caracterização química de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e seus efeitos em plantas e nas bases trocáveis do solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2013.

GANGHIS, D.; ALARSA, M.; TRENTINI, S., Alternativa para a destinação final do cascalho de perfuração de poços de petróleo onshore gerados no Nordeste do Brasil. In: I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 2009. Disponível em <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/21961/14330>.

HEWLETT, P.C. (ed.), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Oxford: BUTTERWORTH HEINEMANN, 4a ed., 2001.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Sistema Informatizado de Licenciamento Ambiental Federal, Ministério do Meio Ambiente, 2015.

JERÔNIMO, C. E. M., KITZINGER, W. G. C. M., Dimensionamento de um landfarming para tratamento de borras oleosas utilizando critérios de um reator batelada, Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria, e-ISSN 2236 1170 - V. 18 n. 3 Set-Dez 2014, <http://dx.doi.org/10.5902/2236117014329>.

JINPENG MINING MACHINERY CO. LTD, Disponível em: https://jinpengmining.com/product/content/Wet-rod-mill-65.html?gclid=Cj0KEQjw-ezKBRCGwqyK0rHzmvkBEiQAu_-LALQYHbEh0hDjCt965Idh6fpxX2eUuls9SxR8efYJOkaAg0k8P8HAQ

LEONARD, S. A., STEGEMANN J. A., Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: leaching studies, Journal of Hazardous Materials, Volume 174, Issues 1–3, 15 February 2010, Pages 484–491.

LU, C., Li, S., Lei, L., Wang, W., Tao, F., & Feng, L.. Bending Strength Properties of Cement Modified with Nano-Materials. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015.

MAHMOUDKHANI, A. H., HUYNH, D., SYLVESTRE, C. J., SCHNEIDER, J., New Environment-Friendly Cement Slurries With Enhanced Mechanical Properties for Gas Well Cementing, CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference, 16-19 June, Calgary, Alberta, Canada, SPE-115004-MS, 2008.

MARTINS, A. A. B., RABELO, S. K. L., FREIRE, M. G. M., Estudo de caso aplicado ao gerenciamento de resíduos sólidos em instalações marítimas de produção de petróleo da Bacia de Campos, Revista Perspectivas Online, Volume 05, Número 02, 2008.

MELLO, C., Tribunal Pleno, julgado em 01/09/2005, DJ 03-02-2006 PP-00014 EMENT VOL-02219-03 PP-00528, 2006.

- MENESES, C. G.; PAULA, G. A., Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da bacia potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento. RUNPETRO, ano 3, Nº 1, p. 29-38, ISSN 2316-668, 2014.
- METSO, Basics in Minerals Processing. 2010. Manual de Britagem, 2005.
- MISSIAGGIA, R. R., Gestão de Resíduos Sólidos Industriais, Sustentabilidade: Resultados de Pesquisas do PPGA/UFRGS, 2013.
- MI SWACO, <http://www.miswaco.com>. Comunicação pessoal, 2009.
- MORETTO, Amilton. O sistema público de emprego no Brasil: uma construção inacabada. 2007. Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.
- OLIVEIRA, D.M.; Aplicação da Técnica de Solidificação/Estabilização para Resíduos Oleosos da Indústria Petrolífera, Utilizando Solo Argiloso e Bentonita, 2003.
- PAULA, J. L., Avaliação da cimentação para projetistas de completação, Universidade Petrobras, 2010.
- PEREIRA, M. S. Caracterização de Cascalho e Lama de Perfuração ao Longo do Processo de Controle de Sólidos em Sondas de Petróleo e Gás. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- PETROBRAS, Sítio eletrônico da Petrobras/Transparência Pública/Contratos de Serviços, disponível em <https://conteudo.imguol.com.br/blogs/52/files/2015/11/Petrobas-contratos.pdf>. Acesso em: 13/05/2017.
- PIRES, P. J. M., Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo para a produção de cerâmica vermelha, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.
- PUC-RJ, certificado digital Nº 0510757/CB, 2009. Em SCHAFFEL, apud PUC-RJ, 2009.
- QUELHAS, A. D.; RODRIGUEZ, M. V. R., A gestão de segurança e saúde ocupacional alinhada aos conceitos da sustentabilidade, XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz de Iguaçu/PR, 2007.
- SCHAFFEL, S. B., A questão ambiental na etapa de perfuração de poços marítimos de óleo e gás no Brasil. Rio de Janeiro, 2002 - COPPE/UFRJ.
- SHIYI, Z., YINGFANG, F., & NINGNING, L., Experimental study on acid resistance of nano-kaolinite modified cement mortar. Journal of Southeast University. Natural Science Edition, 2014.
- SILVA, E. P., Biosorção de Cádmio utilizando o *Aspergillus Niger*, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2002.
- SILVA, M. L. N., FREITAS, D. A. F., CÂNDIDO, B. M., OLIVEIRA, A. H., Manejo e Conservação de solo e da água, Universidade Federal de Lavras, 2015.
- SINQUIFAR NP, Logística Reversa, Sindicato das indústrias químicas e farmacêuticas do norte do Paraná, 2012.
- SUPPIAH, R. R., Development of New Formulation of Geopolymer Cement for Oil Well Cementing, International Petroleum Technology Conference, IPTC-18757-MS, 2016.
- THOMAS, J. E., TRIGGIA, A. A., CORREIA, C. A., FILHO, C. V., XAVIER, J. A. D., MACHADO, J. C. V., FILHO, J. E. S., PAULA, J. L., DE ROSSI, N. C. M., PITOMBO, N. E. S., GOUVEA, P. C. V. M., CARVALHO, R. S., BARRAGAN, R. V., Fundamentos de engenharia de petróleo, Editora Interciência, 2001.

TIANRUI SOLIDS CONTROL - XI'an Tianrui Petroleum Machinery Equipment Co. Disponível em: <http://tianruimachinery-com.buy.peerflix.com/pz691884a-linear-motion-drilling-slurry-shale-shaker-mesh-mud-solid-pitless.html>. Acesso em: 13/05/2017.

VEIL, J. A., SPE, LABORATORY, A. N., Drilling Waste Management: Past, Present and Future. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, 2002; pp 541-551.

VISVANATHAN, C., Hazardous waste disposal, Resources, Conservation and Recycling, Environmental Engineering Program, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, Elsevier, 1996.

YAZDI, N. A., AREFI, M. R., MOLLAAHMADI, E, NEJAND, B. A., To study the effect of adding Fe_2O_3 nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar. Life Science Journal, 2011.